

# Concreto de Alto Desempenho

Eng<sup>o</sup> Marcelo Iliescu

[www.iliescu.com.br](http://www.iliescu.com.br)

[iliescu@iliescu.com.br](mailto:iliescu@iliescu.com.br)

# Objetivos do Curso

- Apresentar o estado da arte do CAD;
- Compreensão do comportamento do CAD à luz dos princípios físicos, químicos e termodinâmicos utilizados na sua produção;
- Compreensão adequada das propriedades e dos procedimentos tecnológicos do CAD, especialmente no tocante à durabilidade e à qualidade produzidas;
- Aprendizado da produção do CAD;
- Identificação das principais erros ocorridos na concepção, produção e execução do CAD;
- Aprendizado das principais técnicas de recuperação e reforço de estruturas à base de CAD.

# Definição do CAD

- Entre as várias definições atuais, existe a do ACI, que descreve CAD como um concreto produzido com tal combinação de performance e uniformidade que não poderia ter sido feito empregando os constituintes convencionais nem práticas comuns de mistura, lançamento e cura.
- O que se mantém constante através das definições dadas ao CAD é que se trata de concreto produzido com seleção cuidadosa de ingredientes de alta qualidade com dosagens e preparo otimizados e lançamento, consolidação e cura atendendo os mais altos padrões industriais e de qualidade.

# Histórico

- Na década de 60, era comum projetos de concretos com 15 a 20 MPa.
- Nesta época, os aditivos disponíveis – os lignossulfonatos – variavam muito em sua composição e pureza e, ainda, tinham forte tendência a incorporar ar quando usados em dosagens elevadas. Mas eram tão baratos que eram julgados suficientes para a produção da época.
- Nesta época, também, os produtores de cinza volante estavam dando seus primeiros passos pela qualidade e consistência de seus produtos.
- Nos anos seguintes, houve a substituição de certa quantidade de cimento por materiais de características pozolânicas.
- No começo da década de 70 novo obstáculo para concretos de elevada resistência: os redutores de água existentes tinham chegado ao seu limite para reduzir a fração A/C e, em excesso, retardavam a pega e aprisionavam quantidade excessiva de bolhas de ar.

# Histórico

- Finalmente com a sua descoberta no início da década de 70, os superplastificantes à base de policondensado naftaleno sulfonado foram introduzidos na construção civil.
- Na década seguinte, os superplastificantes que, seguindo a concepção da época, ao invés de atuarem principalmente como redutores de água, o eram como fluidificantes, para evitar as consequências do acréscimo de água, como a perda de resistência e os riscos da segregação, foram testados além do que se usava normalmente. Para surpresa de muitos, os resultados demonstraram sua eficácia, sem os riscos do lignosulfato
- Os abatimentos dobraram de 75 a 100 mm para cerca de 200 mm e a relação A/C caiu para 0,30, abaixo do qual não havia água suficiente para hidratar todo o material aglomerante.
- Atualmente, utiliza-se o superplastificante policarboxilato.

# Vantagens

- Diminuição das dimensões das peças estruturais, principalmente pilares de edifícios altos, fato que aumenta e melhora os espaços livres, principalmente nos andares mais baixos e mais sobrecarregados;
- Vigas mais esbeltas e de maior comprimento, reduzindo a quantidade total de vigas necessárias em cada pavimento;
- Redução do peso total das estruturas, com a conseqüente redução das cargas nas fundações;
- Redução das deformações imediatas como conseqüência do maior módulo de deformação longitudinal;
- Minimização das deformações lentas, com a redução da fluência devido à menor quantidade de vazios na pasta de cimento;

# Vantagens

- Aumento da durabilidade das estruturas, pelo fato dos CAD serem menos porosos e permeáveis, estando assim menos expostos aos ataques dos agentes agressivos presentes no meio ambiente;
- Redução nos custos devido à redução do volume de concreto necessário e maior rapidez de execução;
- Maior resistência à compressão por unidade de custo, peso e volume;
- Maior módulo de deformação, que é vantajoso quando deflexões controlam o projeto;
- Retorno do investimento financeiro mais rápido, pois devido a sua alta resistência nas primeiras idades, permite um encurtamento do cronograma das obras;
- Menores custos, por possibilitar mais e melhores opções de relações entre o custo e a resistência à compressão dos diversos concretos;

# Desvantagens

- Maior dificuldade de aplicação devido à maior coesão decorrente do uso da sílica ativa e da perda de abatimento;
- Exigência de um controle de qualidade mais apurado;
- Necessidade de procedimentos de cura, devido ao uso da sílica ativa e do baixo consumo de água;
- Alto consumo de cimento, incorporação de aditivo superplastificante, adição de sílica ativa, necessidade do uso de agregados de alta qualidade e maior complexidade do seu uso, inevitavelmente fazem com que o custo unitário deste material, seja bastante superior ao dos concretos convencionais;



# A Microestrutura do CAD

- O CAD apresenta três fases distintas, a saber:
  1. **Pasta matriz** (ou pasta de cimento hidratada, que é a massa contínua de cimento hidratado entre os grãos dos agregados),
  2. **Agregados** (ou o esqueleto granular) e
  3. **Camada intersticial** de interface entre os agregados e a pasta ou **zona de transição**.
- Problema: a redução do fator  $A/C$  e a necessidade de se hidratar todo o cimento; isto é, como conciliar que se deve baixar a relação água para material aglomerante e garantir que todo este material seja hidratado para garantir suas propriedades pozolânicas.

**Afinal, quanta água vai no CAD?**

# A fase agregado

- Nos concretos, em geral, a fase agregado ocupa a parte mais significativa do volume (60 a 70% do total); portanto, os agregados materiais têm grande influência sobre as propriedades do concreto.
- As características dos agregados afetam as propriedades do concreto como a resistência à compressão, devido à resistência mecânica da rocha e a aderência dos grãos à pasta, que varia de acordo com detalhes geométricos dos grãos, como o seu formato (lamelar ou cúbica), petrografia, rugosidade superficial e porosidade.
- Ao contrário do que ocorre em concretos convencionais, em concretos com relações água/aglomerante baixas e resistências à compressão elevadas, as fases da pasta matriz e da zona de transição se tornam tão resistentes que a fase dos agregados pode-se tornar a mais fraca.

# A fase agregado

- A dimensão máxima característica dos grãos dos agregados graúdos também pode ser um fator limitante para a resistência à compressão.
- A fase agregado, devido a sua predominância volumétrica no concreto, também é a principal responsável por propriedades como a massa específica, o módulo de elasticidade, a estabilidade dimensional e a condutibilidade térmica.

# A fase pasta matriz

- O cimento Portland é formado por partículas sólidas compostas, principalmente, por silicatos e aluminatos anidros. Com a hidratação estes compostos formam-se cristais em torno dos grãos de cimento, que com o passar do tempo crescem em tamanho, aumentando a densidade, solidificando e dando resistência mecânica à pasta. Desta maneira, a microestrutura da pasta, cheia de vazios, vai se tornando cada vez mais compacta.
- As principais microestruturas que se formam na pasta matriz são:
  1. Estruturas fibrilares ou estruturas C-S-H: compostos químicos formados por cristais de silicatos de cálcio hidratados que representam 50% a 60% do volume total de sólidos da pasta e são os responsáveis pela resistência mecânica da pasta após os dias iniciais;

## A fase pasta matriz

2. Prismáticas: cristais de grande tamanho, formadas por hidróxido de cálcio, que representam 20 a 25% do volume total de sólidos da pasta. São responsáveis pelo pH elevado da pasta ( $\text{pH} \cong 12,5$ ), mas são bastante solúveis em água. Tem baixa resistência mecânica;
3. Etringita: cristais grandes e volumosos, formados pela hidratação dos aluminatos combinados com sulfato de cálcio, quimicamente instáveis e muito porosos, gerando estruturas com baixa resistência mecânica que, com o tempo, se transformam em monossulfato. São os primeiros cristais da pasta a se formar e produzem a primeira resistência mecânica do endurecimento, pequena se comparada a das estruturas C-S-H. Representam 15 a 20% do volume total de sólidos;
4. Grãos de clínquer não hidratados: pequenos núcleos dos grãos de cimento.

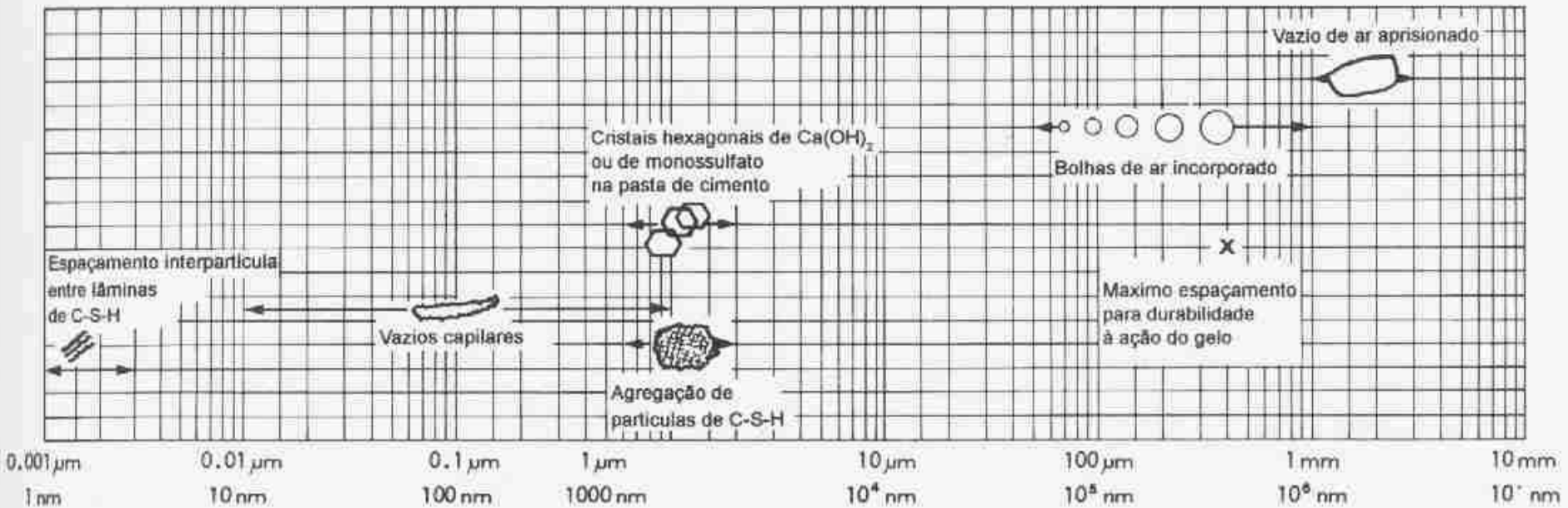
# A fase pasta matriz

- Além das microestruturas sólidas, os vazios são de grande influência nas características da pasta matriz endurecida. Quanto maior a quantidade de vazios e maiores forem os seus diâmetros médios, maiores serão a porosidade e a permeabilidade, reduzindo a resistência química e mecânica da pasta, aumentando também a sua retração e a fluência.
- Os principais vazios da pasta, colocados em Mehta&Monteiro (1994), estão mostrados na próxima figura e são descritos a seguir:
  1. Espaço interlamelar das estruturas C-S-H, lamelas muito próximas, cujo afastamento fica entre 5 a 25 Å (1 Å = 10<sup>-10</sup>m). São poros muito pequenos, que pouco afetam a resistência mecânica ou a permeabilidade da pasta. O principal efeito desses poros é a retração, quando acontece a saída da água que os preenchia;

## A fase pasta matriz

2. Vazios capilares: são poros onde o excesso da água de amassamento fica aprisionado. Somente cerca de 21% do peso de cimento em água (água estequiométrica), fica combinada quimicamente na pasta. A maior parte da água colocada além deste percentual fica aprisionada nestes poros. Poros capilares com diâmetros superiores a  $500 \text{ \AA}$  favorecem a permeabilidade e prejudicam a resistência mecânica, já poros com diâmetros inferiores a  $500 \text{ \AA}$  influenciam mais a retração e a fluência;
3. Ar incorporado são pequenas bolhas de ar com diâmetro médio de 5 mm, aprisionadas pelo concreto durante o processo de mistura dos seus componentes. Normalmente, cerca de 1 a 2% do volume total de um concreto é ar. Formam bolhas com diâmetro de 50 a  $200 \mu\text{m}$ , que favorecem a trabalhabilidade;

# Dimensões dos sólidos e vazios da pasta endurecida, mostrados em escala logarítmica





# As Adições Minerais

# A Sílica Ativa

- Subproduto da fabricação de silício metálico e do ferro-silício aparece na construção civil a partir da década de 80, após regulamentação imposta pelos órgãos ambientalistas
- Seu diâmetro (em média = 1% do diâmetro do cimento) permitem o “efeito filer”, caracterizado como preenchimento de vazios entre grãos de cimento antes mesmo das reações de hidratação dos aglomerantes
- É constituída por  $\text{SiO}_2$  em cerca de 90% nas diversas modalidades
- Sua área específica oscila em volta dos 20.000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , bastante superior à do cimento  $\sim 1.500 \text{ m}^2/\text{kg}$
- Seu teor muito elevado de  $\text{SiO}_2$ , seu estado amorfo (resultante da velocidade de resfriamento) e sua alta finura a tornam material pozolânico de muita reatividade medida pelo Método de Chapelle, igual a 800 mg  $\text{CaO}/\text{g}$  amostra

# A Sílica Ativa

- As partículas ultrafinas da sílica ativa formam cristais de  $\text{Ca(OH)}_2$ , hidróxido de cal, chamado de portlandita,
- A sílica ativa apresenta densidade de massa específica de  $2.200 \text{ kg/m}^3$

# Adição de sílica ativa

- Com a adição de sílica ativa ao cimento, ocorrem sobre a pasta matriz efeitos químicos e físicos. A ação química é decorrente da reação pozolânica entre a sílica ativa e o hidróxido de cálcio, produzindo uma quantidade adicional de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que obstrui e reduz os poros. A ação física é o efeito filer, que preenche os vazios criados pela água livre na pasta matriz, produzindo um melhor empacotamento da microestrutura. Esses efeitos, em conjunto, causam uma melhora na microestrutura e nas características da zona de transição, tornando a pasta matriz mais densa e diminuindo a sua permeabilidade. Aumenta assim, a resistência dos concretos. Entretanto, como a sílica ativa é mais fina que o cimento, ocorre um aumento do consumo de água do concreto e das quantidades necessárias de aditivos superplastificantes.

# Metacaulim

- Material pozolânico de alta reatividade, proveniente da calcinação de argila caulinítica que reage com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) resultante da hidratação do cimento, em presença de água, tornando-se um composto aglomerante.
- Substituição de parcela de cimento não representa somente economia de dinheiro, mas menor risco de movimentações térmicas devido ao menor calor de hidratação, menor risco de penetração de cloretos, maior durabilidade, maior módulo de elasticidade e menor deformações por cargas de longa duração e, acima de tudo, economia de recursos minerais, colaborando para a preservação do meio ambiente e para o desenvolvimento sustentável.

# Metacaulim

- Área superficial específica de 740 m<sup>2</sup>/kg, diâmetro médio das partículas de 12 µm e densidade de massa específica de 2650 kg/m<sup>3</sup>
- A atividade pozolânica do metacaulim medida através do Método de Chapelle resultou em 730 mg CaO/g amostra.
- A resistência à tração aumenta com o tempo. Isso se deve ao fato de que as reações químicas de hidratação e, concomitantemente, as reações pozolânicas estarem ocorrendo com o tempo. À medida que o cimento do concreto se hidrata ocorre liberação de hidróxido de cálcio que é aproveitado pelo Metacaulim que, juntamente com água, forma um novo composto aglomerante aumentando as ligações internas do concreto.

# Sílica ativa x Metacaulim

- Os resultados de resistência à compressão, resistência à tração e de módulo de elasticidade, superam sempre e significativamente os obtidos do concreto de referência, sem adições. Tais melhorias são equivalentes às promovidas pela sílica ativa, podendo-se concluir que, para efeito de utilização em concretos de alto desempenho, o metacaulim é bastante promissor e representa uma opção interessante na busca da melhoria da qualidade, da economia e da durabilidade.
- Isto se deve ao fato de que as reações pozolânicas, ocorridas dentro dos concretos na presença de hidróxido de cálcio e água, resultam em aglomerantes que preenchem os poros que seriam ocupados pelo hidróxido de cálcio e/ou pela água responsáveis pela menor resistência encontrada nos concretos de referência.

# Escória de Alto-Forno

- As indústrias de cimento utilizam, em sua maioria, escórias provenientes dos altos-fornos à coque. As limitações normativas estabelecem que o teor máximo de escória que pode ser adicionada ao cimento tipo III é 70%.
- A escória granulada de alto-forno é um sub-produto da fabricação do gusa, constituído em sua maior parte de aluminossilicatos de cálcio na forma vítrea. A fusão das impurezas associadas ao minério de ferro e dos fundentes através de reações químicas formam a escória.
- Para que a escória possua atividade hidráulica, ela deve estar no estado amorfo, ou seja, deve ser resfriada rapidamente desde o estado líquido a 1500°C até a temperatura de 200 °C, evitando associações dos átomos em cristais, fato este conhecido como cristalização. A ação de resfriamento brusco da escória líquida é denominado granulação.



# Escória de Alto-Forno

- A atividade hidráulica da escória granulada de alto-forno à coque, depende de vários fatores, como composição química, grau de vitrificação, resfriamento, estrutura cristalina, composição mineralógica, granulometria, superfície específica, micro heterogeneidade e os defeitos superficiais.
- A composição química das escórias está relacionada à homogeneidade da escória líquida, à sua elevada capacidade de dessulfuração e à baixa viscosidade.
- Como vantagens são citadas a minimização da reação expansiva álcali-agregado, a diminuição da permeabilidade, o aumento da resistência aos sulfatos, a diminuição da retração por secagem, a diminuição do calor de hidratação, o aumento da resistência mecânica à compressão em idades avançadas, a diminuição da resistência à compressão nas primeiras idades, o aumento da resistência à tração.

# Cinzas Volantes

- Designação dada ao material obtido pela captação mecânica em filtros de saco ou dispositivos semelhantes, das poeiras contidas na fumaça produzida pela queima de combustível nas centrais termoelétricas a carvão. A designação de *volantes* ("que voam") resulta da leveza das partículas, as quais, na ausência de dispositivos de filtração, seriam arrastadas pelos gases para a atmosfera como fumo.
- As cinzas volantes são um pó mineral fino, com características pozolânicas, constituído por pequenas partículas esféricas com dimensões que variam entre 0.5 e 100  $\mu\text{m}$ , que resulta da fusão e calcinação das impurezas minerais incombustíveis contidas no carvão, queimado a altas temperaturas e pressões. Os grãos de cinza são sólidos amorfos que ganham a sua estrutura esférica por solidificarem em suspensão no fluxo gasoso resultante da queima.

# Cinzas Volantes

- A composição química das cinzas volantes é dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).
- Exibem também atividade pozolânica, reagindo à temperatura normal e em presença de água com o  $\text{Ca(OH)}_2$  e com álcalis para formar silicato de cálcio hidratado, compostos com capacidade de pega, isto é que atuam como aglomerantes em agregados.
- São classificadas pela norma ASTM C618 em duas categorias: Cinzas volantes da classe F e da classe C, sendo a principal diferença entre aquelas classes o teor em cálcio, sílica, alumina e ferro existente na sua composição.
- As CV de classe C têm propriedades pozolânicas e aglomerantes.
- A composição química das cinzas é dependente das características dos carvões queimados e das impurezas que contenham.

# A fase zona de transição

- Com o advento da técnica da microscopia eletrônica em substituição à microscopia ótica, ampliou-se o campo de visão e pôde ser revelada aos pesquisadores uma nova camada: a “zona de transição”, região de espessura variando de 10 a 50  $\mu\text{m}$  ao redor de cada agregado graúdo.
- Anteriormente a este avanço tecnológico, no nível macroscópico, o concreto era um material composto por duas fases: **partículas de agregado** dispersas na **matriz de cimento** (argamassa composta por areia, aglomerante, água e aditivos redutores de água).
- A zona de transição é instável, pois varia com o tempo, umidade ambiente e temperatura.
- Graças à constituição de seus materiais, dá-se a formação de etringita e hidróxido de cálcio, mais porosos que na matriz. Além disso e por conta da alta concentração de água, esta zona é mais fraca que as suas vizinhas, iniciando-se aí as fissuras e a deterioração da estrutura.

# Considerações sobre a zona de transição

- **Estrutura:** no concreto recém compactado, um filme de água envolve as partículas maiores do agregado. Esta espessura depende da distribuição granulométrica do agregado e seu tamanho. Daí a presença de fator A/C mais elevado nesta posição.
- **Resistência:** menor que a da matriz, pois é mais porosa que ela. Além disso, sofre pela presença de microfissuras por secagem ou resfriamento, afetadas pela espessura do filme de água.
- As diferenças inevitáveis das propriedades mecânicas do agregado e da pasta, em conjunto, com retração e variações térmicas, resultam **fissuras muito finas na interface, mesmo antes de aplicação do carregamento**, sendo que a quantidade de microfissuras depende de inúmeros parâmetros, incluindo a distribuição granulométrica e tamanho do agregado, teor de cimento, relação água/aglomerante, grau de adensamento do concreto fresco, condições de cura e umidade ambiente.

# Procedimentos para produção do CAD

Quando se objetiva a produção de CAD, há necessidade de melhorias nas características da zona de transição da pasta matriz. Procedimentos que apresentam bom desempenho para isso são:

1. Redução da relação água/aglomerante e
2. Uso de adições pozolânicas, em especial a sílica ativa ou o metacaulim, que provocam na região o efeito microfíler e reações pozolânicas.
3. Substituição de parte do cimento por adições suplementares para evitar o surgimento de fissuras, pois o CAD consome de 400 a 550 kg/m<sup>3</sup> de cimento com alto calor de hidratação e excessiva retração.
4. Agregados miúdos com módulos de finura (MF) com valores abaixo de 2,5 tornam o concreto excessivamente viscoso, tornando-o difícil de aplicar. Mehta & Aïtcin recomendam MF com valor próximo a 3,0, portanto areias mais grossas, que proporcionam uma pequena redução na quantidade de água na mistura para uma mesma trabalhabilidade.

# Considerações sobre Porosidade e Permeabilidade

- **Porosidade** é o agente físico de controle da taxa de deterioração e representa uma característica diretamente relacionada à relação água/aglomerantes, ao tipo de cimento e ao grau de hidratação do concreto. Ela também é ligada às características dos poros, como seu diâmetro, conectividade e seu volume total, a quantidade de ar incorporado, ao volume de água disponível, à variação dimensional dos sólidos e dos poros de uma pasta de cimento endurecida.
- Helene (1993) esclarece a importância dos tipos de poros na durabilidade do concreto, classificando-os em: **macroporos**  $\Phi \geq 50 \mu\text{m}$  e **microporos**, sendo o primeiro de grande influência na durabilidade das estruturas, chegando a 2/3 do volume total de poros do concreto.
- Quanto ao tamanho dos poros, deve-se considerar que a relação água/aglomerantes é o agente controlador da porosidade. Portanto, quanto maior a relação A/C, maior a porosidade resultante.

# Considerações sobre Porosidade e Permeabilidade

- De acordo com Uchikawa (1986), a permeabilidade do concreto à água, encontra-se relacionada ao volume de poros com diâmetro superior a  $130 \mu\text{m}$ .
- A resistência do concreto ao ataque químico é regida pela permeabilidade da pasta, a qual é função da porosidade capilar. Assim, numa pasta de estrutura compacta, o ataque se restringirá à superfície, enquanto que uma pasta porosa permitirá que a ação dos agentes agressivos ocorra em seu interior. Entretanto, grande nº de macroporos ou vazios diminui a resistência da estrutura.
- À medida que se hidratam, os espaços vazios do cimento vão sendo preenchidos pelos produtos da hidratação. A permeabilidade de uma pasta ( $A/C=0,7$ ) completamente hidratada tem coeficiente de permeabilidade de  $6 \text{ cm/s} \times 10^{-11}$ , enquanto que a mesma pasta fresca tinha  $2 \text{ cm/s} \times 10^{-4}$ .



# Ações para redução da Porosidade

- Para a produção do CAD é necessário reduzir a porosidade, portanto, necessário se faz reduzir a quantidade de ar incorporado e do fator A/C (água/aglomerantes).
- Como consequência da redução de A/C, a pasta de cimento hidratada não contém nenhuma grande pilha de plaquetas hexagonais de CaO, nem longas agulhas de etringita e nem, finalmente, longos filamentos pilosos de C-S-H, características de pastas hidratadas com A/C altos.
- Ações de consolidação diminuem as bolhas de ar incorporadas.
- A dispersão induzida pelos superplastificantes impedirá a tendência natural das partículas de cimento flocularem de modo facilitado.
- Adição de sílica ativa ou metacaulim para redução da espessura da zona de transição e aumento de sua densidade.

# Dos redutores de água aos superplastificantes

- Há cerca de 70 anos, descobriu-se que certas moléculas orgânicas, conhecidas por suas propriedades dispersivas, podiam também ser usadas para neutralizar as cargas elétricas presentes na superfície do cimento e, assim, reduzir sua tendência a flocular.
- O 1º destes agentes dispersivos foi o lignossulfonato, obtido em resíduos das fábricas de polpa de papel, barato e que necessita de um procedimento simples para ser reduzir de 5% a 10% de água no concreto. Entretanto, acima destes valores, gera retardamento da pega devido à presença de açúcares de madeira e aprisionamento de grandes bolhas de ar causadas por substâncias de ação de superfície.
- Com lignossulfatos o concreto pôde atingir 50 a 60 MPa.

# Dos redutores de água aos superplastificantes

- Próximo passo foi dado pela redescoberta da utilidade dos policondensados sulfonados naftaleno-formaldeído e melamina-formaldeído, no final dos anos 70.
- Sendo produtos sintéticos e não contendo açúcares e impurezas de ação de superfície, estes novos dispersores podiam ser adicionados em quantidades maiores, mas, tinham contra si, o baixo período de vida, de cerca de 15 a 30 minutos. Portanto, a mistura saía da usina com lignossulfonato e era aditivada com o policondensado minutos antes de ser lançado às formas.
- Com a melhoria do tempo de vida dos policondensados, que em alguns casos atinge 45 a 90 minutos, foi possível produzir concretos fluidos com fator água/aglomerante menor que 0,30.

# Tipos de superplastificantes

São 4 famílias, a saber:

- Sais sulfonados de policondensados de naftaleno e formaldeído;
- Sais sulfonados de policondensados de melamina e formaldeído;
- Lignossulfonatos com teores muito baixos de açúcares e de surfactantes;
- Policarboxilatos.

Destas, as duas primeiras são as mais utilizadas, enquanto que a última vem ganhando adeptos.

# Hidratação do cimento com superplastificantes

- Atualmente, não existe teoria clara e aceita para explicar a ação dos superplastificantes sobre o cimento durante sua hidratação.
- As hipóteses foram se sucedendo, sendo a 1ª de que a interação entre as partes era só de natureza física. A seguir, foi formulada hipótese da natureza química e, finalmente, foi adicionada hipótese da hidratação orientada para as diversas fases do cimento.
- Entretanto, algumas teses já são compreendidas, a saber:
  1. Para um dado cimento, a dosagem de superplastificante necessária para obter fluidez da pasta aumenta com a área específica do cimento;
  2. A pega é afetada pela quantidade de sulfatos em dissolução e pelo valor da relação  $\text{SO}_4^{--} / \text{AlO}_2^-$ , gerando “falsa pega” quando este valor é muito alto ou à “pega instantânea”, quando muito baixo.

# Hidratação do cimento com superplastificantes

1. O desenvolvimento do calor de hidratação é retardado quando a dosagem do superplastificante é aumentada, pois suas moléculas podem ficar adsorvidas no  $C_3S$ .
2. O uso do cimento com o somatório resultante de  $C_3A$  e  $C_4AF < 10\%$  é mais econômico, quanto à dosagem do superplastificante.
3. O sulfato de cálcio é adicionado ao clínquer para controlar seu tempo de pega. Em sua presença, o  $C_3A$  é transformado em etringita ( $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ ) e bloqueia qualquer nova hidratação do  $C_3A$ . Entretanto, o sulfato de cálcio tem sido adicionado ao clínquer em diversas formas e, para cada uma delas há de se testar qual a dosagem do superplastificante.

# Retração

- O fenômeno da retração no concreto é a saída da água dos vazios capilares existentes na pasta. A quantidade de retração é proporcional ao volume de água utilizado no concreto.
- A retração do concreto endurecido não curado com água é igual à soma da retração plástica, da térmica, da autógena e da hidráulica.
- A retração em CAD, devido ao seu alto consumo de cimento e baixo consumo de água, difere da que ocorre nos concretos convencionais, manifestando-se, principalmente, nas seguintes formas:
  1. Retração plástica, que acontece ainda com o concreto no estado fresco;
  2. Retração autógena, decorrente da auto-dessecação pela hidratação dos cimentos, significativa em concretos com relação água / aglomerante baixa;

# Retração

3. Retração por secagem, que acontece com a saída da água do concreto endurecido;
4. Retração térmica, variação de comprimento que o concreto experimenta quando a temperatura varia;



# Fluência

1. Fluência é o fenômeno de redução de dimensões de uma peça de concreto que ocorre pela exposição desta a uma tensão constante. A fluência acontece devido à presença de vazios na pasta de cimento endurecida, é estreitamente relacionada com a retração e sua intensidade depende primariamente da intensidade da tensão mas, também, é influenciada pela composição do concreto e sua relação água/aglomerante.
2. A fluência em concretos que utilizam aditivos superplastificantes é bastante reduzida.

# Floculação e Dispersão

- A floculação do cimento ocasiona o aprisionamento de parte da água, tornando-a indisponível para a hidratação do cimento e fluidificação da mistura. A tendência à floculação, é resultado de vários tipos de interações: forças de Van der Waals entre partículas, forças eletrostáticas entre partículas com cargas opostas e fortes ligações envolvendo moléculas de água ou compostos hidratados.
- A atuação dos superplastificantes consiste em dispersar as partículas de cimento que têm uma forte tendência a flocular quando misturadas à água de amassamento. Com isso, quando as moléculas longas do superplastificante são adsorvidas pelas partículas de cimento, conferem uma forte carga negativa, a qual auxilia numa redução considerável da tensão superficial da água circundante, resultando na defloculação e dispersão das partículas de cimento, aumentando acentuadamente a fluidez do sistema

# Floculação e Dispersão

- Os principais mecanismos capazes de explicar os efeitos de dispersão e fluidificação promovidos pelos superplastificantes são a redução da tensão superficial da água, a repulsão eletrostática induzida nos grãos do cimento, a repulsão estérica e a formação de um filme lubrificante entre esses grãos.
- Entre esses mecanismos de ação, a repulsão eletrostática e a repulsão estérica são as principais responsáveis pela dispersão das partículas. A repulsão eletrostática explica-se pelo fato de as moléculas dos aditivos plastificantes e superplastificantes, após dissolução em água, apresentarem em sua superfície cargas preponderantemente negativas, principalmente pela ionização dos grupos sulfônicos e carboxílicos. Uma vez adsorvidas nas partículas de cimento, essas moléculas induzem o surgimento de cargas negativas em sua superfície, resultando em repulsão entre partículas vizinhas.

# Floculação e Dispersão

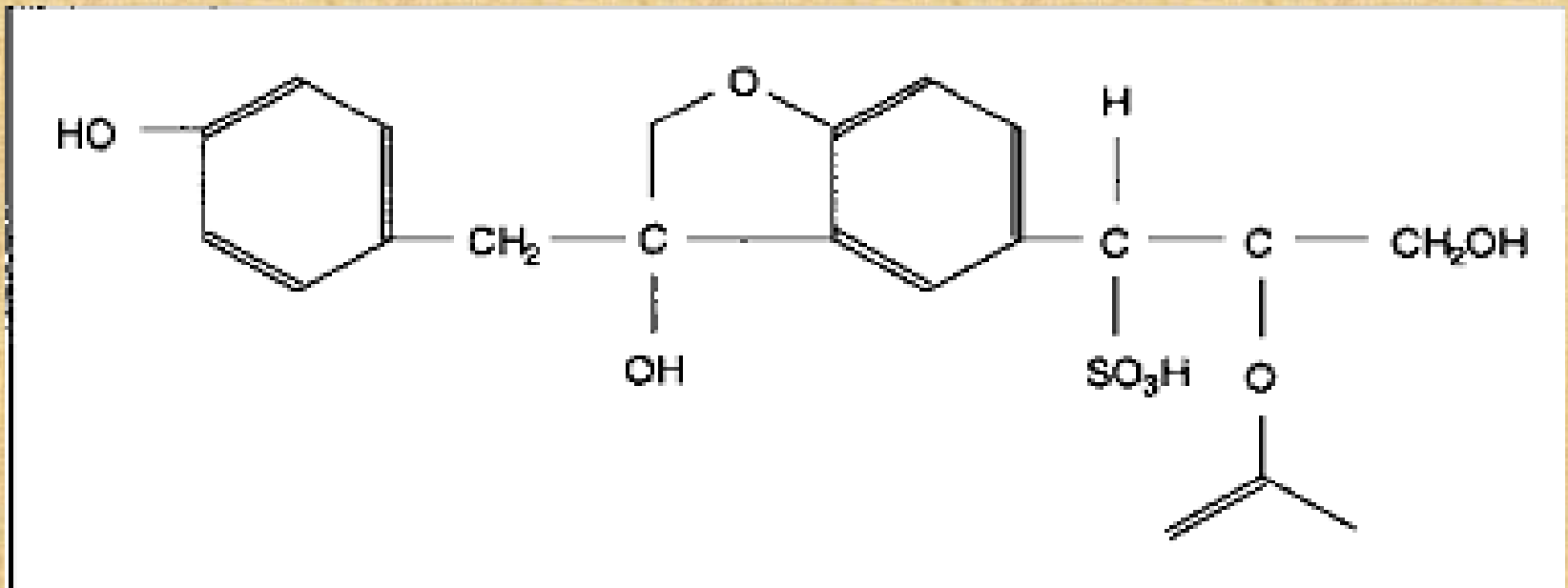
- Esse efeito é chamado de **repulsão eletrostática** e caracteriza o principal modo de ação dos aditivos de base lignossulfonato de sódio, naftaleno sulfonato de sódio e melamina sulfonato de sódio. Já os aditivos de base policarboxilato de sódio, por apresentarem elevada massa molecular, além do efeito eletrostático, efetuam a dispersão através de **repulsão estérica**, que consiste em uma barreira física que impede a aproximação das partículas.
- As interações entre cimento e aditivo são muitas vezes de difícil entendimento, uma vez que envolvem dois sistemas químicos complexos.

# Características dos Superplastificantes

<b>Aditivo dispersante</b>	<b>Aditivo L</b>	<b>Aditivo N</b>	<b>Aditivo P</b>
Composição química	Lignossulfonato	Nafataleno sulfonato	Policarboxilato
Densidade (kg/l)	$1,08 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$	$1,21 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$	$1,07 \text{ a } 1,11 \text{ g/cm}^3$
Estado físico	Líquido	Líquido	Líquido
Teor de sólidos (%)	22,0	40,0	30,0
Dosagem recomendada pelo fabricante (% m.c.)	0,2 – 0,45	0,8 – 1,5	0,5 – 0,8

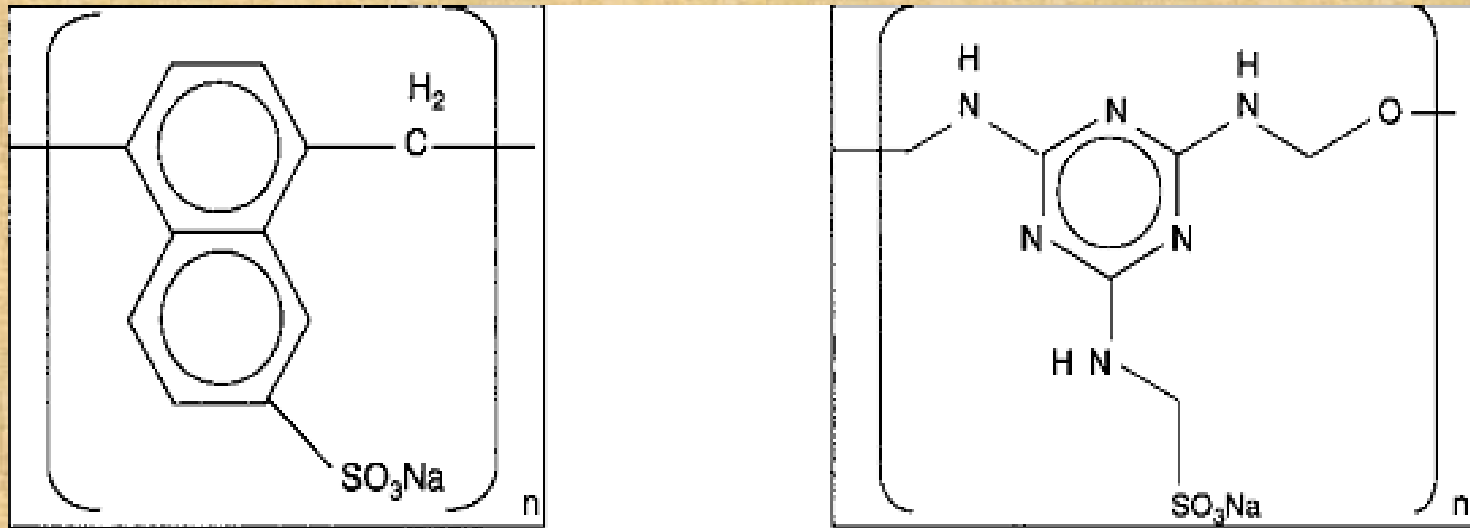
# Lignossulfonato

- São conhecidos como aditivos plastificantes de 1ª geração e utilizados como redutores de água normais. É obtido a partir do rejeito líquido do processo de extração da celulose da madeira, sendo que a lignina está presente em cerca de 20%. Permite a redução de 8% a 12% de água na mistura. Em excesso provocam retardo da pega e incorporação de grande quantidade de ar.



# Naftaleno e Melanina Sulfonatos

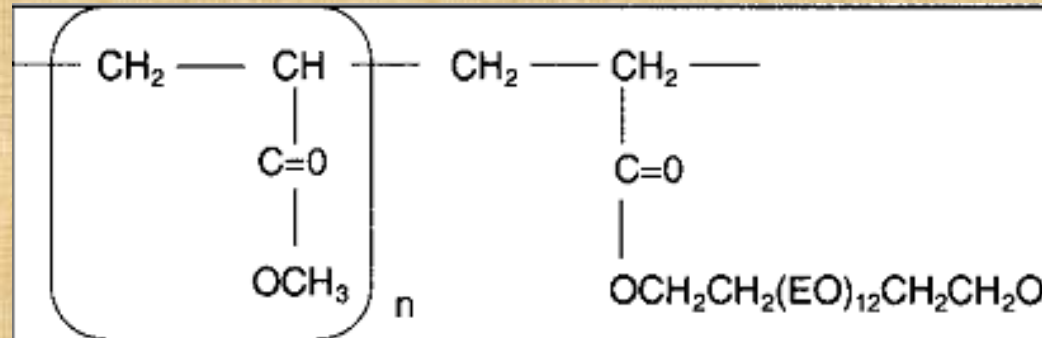
- São obtidos a partir de técnicas de polimerização: sulfonação, condensação, neutralização e filtração. Conhecidos como aditivos superplastificantes de 2ª geração e permitem redução de até 25% de água na mistura.



Polinaftaleno sulfonato de sódio

Polimelanina sulfonato de sódio

# Policarboxilato



produtos base policarboxilato também atuam por repulsão eletrostática, mas não é esse o seu mecanismo principal de ação. Além de agirem por repulsão eletrostática, a dispersão das partículas de cimento pode ser relacionada a um efeito conhecido com repulsão estérica que é produzida pela presença de uma longa cadeia lateral ligada em vários pontos na cadeia central do polímero. Esta arquitetura produz forte efeito dispersante, pois o impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas de aditivos cria uma capa de adsorção de grande volume que impede a aproximação das partículas de



# Comparação entre Superplastificantes

- O aditivo de base **lignossulfonato** é o que proporciona maior economia em virtude de seu baixo preço, o que explica e justifica seu uso em larga escala pelas concreteiras.
- Apesar da eficiência do aditivo de base **policarboxilato** em aumentar a fluidez com pequenas dosagens, seu preço ainda é muito elevado em relação aos dos demais aditivos e, por esse motivo, seu uso fica limitado a aplicações de concretos de alto desempenho, para os quais os demais aditivos não promovem a dispersão suficiente e necessária das partículas de cimento. Como exemplos, podem-se citar o concreto auto-adensável e o concreto de alta resistência.

# Cura do CAD

- O tipo, o momento de início e a duração das condições de cura afetam significativamente a resistência dos concretos com ou sem sílica ativa. Na maioria dos casos, os concretos submetidos à cura úmida apresentaram as maiores resistências; sendo, portanto, o método de cura mais indicado para CAD.
- O início da cura deverá ser imediato, após a desforma ou após o desempenho no caso de lajes. Quanto à duração da cura úmida, é recomendado um período de 7 dias consecutivos como suficientes para que os concretos com sílica ativa desenvolvam a resistência e durabilidade esperadas.

# Evolução do $f_{ck}$ com o tempo

- Algumas normas internacionais propõem equações empíricas para previsão da evolução da resistência à compressão com o tempo, ajustadas para concretos com cimentos de alta resistência inicial, submetidos à cura úmida:

- O ACI 209R-92 (2001), recomenda a equação:

$$f_{cm}(t) = [t / (2,3 + 0,92 \cdot t)] \cdot f_{c28} \quad (MPa) \text{ onde:}$$

$f_{cm}(t)$  = resistência média à compressão aos  $t$  dias.

$f_{c28}$  = resistência média à compressão aos 28 dias.

- O Código MC90 do CEB-FIP (1991), recomenda a equação:

- $f_{cm}(t) = \exp \{0,20 \cdot [1 - (28/t)^{0,5}]\} \cdot f_{c28} \quad (MPa)$

# Módulo de Elasticidade

- As deformações dos elementos estruturais que compõem as estruturas de CAD têm importância tão relevante quanto sua resistência aos esforços mecânicos.
- O módulo de elasticidade é obtido através da relação entre a tensão aplicada e a deformação resultante no ensaio de corpos-de-prova sob compressão axial. Este parâmetro resulta na inclinação da curva tensão x deformação do concreto. O módulo de elasticidade secante (Ecs) é obtido através da inclinação da reta que liga a origem ao ponto da curva que corresponde a 40% da tensão de ruptura. Sua determinação é feita de acordo com a NBR 8522 (1984).
- A bibliografia existente, na falta de ensaios para determinação do módulo de elasticidade secante (Ecs), fornece estimativas do valor do módulo de elasticidade secante através das seguintes equações:

# Módulo de Elasticidade

- O ACI 363R-92 (2001) sugere, para  $21\text{MPa} < f_c < 83\text{MPa}$

$$E_{cs} = 3320 \cdot \sqrt{f_c} + 6900 \text{ (MPa)}$$

- O ACI 318-99 (2001), sugere para  $f_c < 80 \text{ MPa}$ :

$$E_{cs} = 4730 \cdot \sqrt{f_c} \text{ (MPa)}$$

- O Código MC90 do CEB-FIP (1991), sugere para  $f_c < 80 \text{ MPa}$ :

$$E_{cs} = 8500 \cdot (f_c + 8)^{\exp 1/3} \text{ (MPa)}$$

- Iravani (1996), sugere, para  $55\text{MPa} < f_c < 125\text{MPa}$ :

$$E_{cs} = 4700 \cdot C_{ca} \cdot \sqrt{f_c} \text{ (MPa)}$$

onde,  $C_{ca}$  = coeficiente empírico para os agregados graúdos:

quartzito – 0,97; calcário e dolomito - 0,92; diabásio – 0,90; granito - 0,82; entre outros.

# Bibliografia

- Aitcin, PC - Concreto de Alto Desempenho, SP, Ed. Pini, 2000
- State of the Art on High Strength Concrete (1997) Report by Committee 363, ACI 363R-92
- Pinheiro, LM & Dumet, TB - A evolução do concreto: uma viagem no tempo - Ibracon 42° CBC
- Moreno Jr, R & Isa, MM - Utilização de sílica ativa no concreto de alto desempenho - Ibracon 42° CBC
- High Performance Concrete - Recommended Extensions to the Model Code 90 - CEB Bulletin No. 228
- Application of High Performance Concrete - CEB Bulletin No. 222
- Lacerda, CS & Helene, P - Estudo da resistência mecânica em CAD com metacaulim- Ibracon 45° CBC

Sessão encerrada  
Obrigado a todos

Eng<sup>o</sup> Marcelo Iliescu  
iliescu@iliescu.com.br  
www.iliescu.com.br