

Microestrutura do Concreto e suas Deformações

Origens das Patologias

Patologias durante a Concepção

- Falhas no estudo preliminar e no ante-projeto
- Falhas no projeto final de engenharia, levando a:
 1. Má compreensão das ações atuantes ou da combinação mais desfavorável, escolha incorreta do modelo analítico, deficiência de cálculo da estrutura ou da avaliação da capacidade portante do solo;
 2. Incompatibilidade entre estrutura, arquitetura e instalações;
 3. Especificação insuficiente de materiais;
 4. Detalhes construtivos inadequados;
 5. Erros de dimensionamento.

Patologias durante a Construção (1)

- Pouca capacitação profissional da mão-de-obra e/ou fraco comando, falta de motivação, irresponsabilidade e sabotagens;
 - Má qualidade de materiais e componentes;
 - Erros de geometria, tais como falta de prumo, de esquadro e de alinhamento dos elementos, desnivelamento de pisos e/ou falta de caimento em pisos molhados;
 - Argamassas de assentamento de revestimentos com espessuras \neq ;
 - Flechas e/ou rotações excessivas;
 - Deficiente controle de qualidade de execução e/ou fiscalização;
- É conclusão do Bol. 183, item 10.2, que a deficiente formação na construção civil é o principal fator de não-obtenção de estruturas duráveis ou de bom desempenho

Patologias durante a Construção (2)

- A motivação dos trabalhadores está relacionada à quantidade de informações técnicas a eles transmitida!
- As indústrias de materiais e componentes, em média, estão afastadas dos objetivos da qualidade das construções, que investem pouco na melhoria técnica e funcional de seus produtos;
- A ausência de normalização de diversos materiais e procedimentos, acrescida pela falta de fiscalização daqueles já normalizados;

“A menor durabilidade, os erros dimensionais, a presença de agentes agressivos incorporados e a baixa resistência mecânica são apenas alguns dos muitos problemas que podem ser implantados nas estruturas como consequência da baixa qualidade dos materiais e da deficiente formação técnica”;

Patologias durante a utilização

- A estrutura deverá ter manutenção eficiente, em especial, nas partes onde o desgaste e a deterioração são maiores;
- Deve ser evitada manutenção ineficiente ou inadequada, devendo ser prevista verba específica para tal;
- Devem ser feitas limpezas e impermeabilizações nos locais que possam acumular águas, tais como pleigraundes, coberturas, marquises, pistas e piscinas;

Causas da Deterioração das Estruturas

- Deficiências da concretagem, causando porosidade;
- Inadequação das formas;
- Mau detalhamento das armaduras;
- Utilização incorreta dos materiais do concreto;
- Insuficiência do controle de qualidade;
- Falha humana de manutenção inadequada;
- Causas químicas e eletroquímicas;
- Causas físicas;
- Causas biológicas

Deficiências da concretagem (1)

- A trabalhabilidade e a aderência do C não devem ser perdidas. Cuidado com o excesso de água!
- Os meios de transporte não devem provocar segregação, não podem permitir perda de água, pasta de cimento ou argamassa, muito menos permitir a separação entre os componentes do C;
- O lançamento não pode deslocar as armaduras, nem os chumbadores ou os distanciadores;

Deficiências da concretagem (2)

- As inevitáveis juntas de concretagem estão “proibidas” em regiões de elevadas tensões tangenciais;
- Ao se retomar a concretagem deve-se eliminar pós, resíduos, gorduras e óleos para recuperar a aderência;
- O adensamento deve ser provido de vibradores cf. a peça para evitar vazios, ninhos, cavidades e bolhas;
- A cura é fundamental! Pelo menos 7 dias e, se possível, 14, iniciada logo após a pega.
- “Quanto maior for o tempo de cura, ou seja, quanto mais tempo se impedir a saída de água do C, melhores serão características tais como tensão à ruptura, impermeabilidade e resistência ao desgaste e aos ataques químicos”;

Características dos Mecanismos de Transporte

- Difusão pelo ar é o MT de gases, água e agentes agressivos diluídos, tais como cloretos, sulfatos e carbonetos. Depende da umidade relativa do ar;
- Capilaridade é o MT da chuva ou das marés. É por adsorção às paredes dos poros;
- Penetração direta por pressão é o MT da imersão.
- Daí que deve-se buscar C densos, através de:
 1. Redução ao mínimo o fator A/C
 2. Impedimento da evaporação da água de hidratação da pasta, através dos procedimentos de cura;

Métodos de Cura

- Manutenção das formas, molhando-as com freqüência para dilatá-las e impedir a evaporação nas juntas e fendas;
- Revestimento integral das superfícies expostas com água, areia, serragem, juta e plástico entre outros;
- Aspersão com água a intervalos regulares;
- Aplicação de membranas de cura \pm impermeáveis ao vapor d'água;
- Utilização de cura acelerada, por $\Delta\Theta$ e/ou de pressão;

Estrutura porosa do concreto

- Metha afirma: “A impermeabilidade do C deve ser a 1ª linha de defesa contra qq. processo físico-químico de deterioração”;
- Degradação do CA está diretamente ligada à possibilidade de transporte interno de água, gases e agentes agressivos;
- C como pseudo-sólido de células porosas e gelatinosas;
- Quanto aos poros, importam as dimensões, mas também as interligações que constituem os canais, algo em torno de 20 a 30%;
- Bol. 183/89 do CEB classifica os poros, segundo seu \emptyset , em: microporos $< 10 \times 10^{-7,5}$ < poros capilares $< 10 \times 10^{-4,5}$ < macroporos;
- A durabilidade está ligada aos macroporos e poros capilares;

Composição do Concreto

- No nível macroscópico, o C é um material composto por duas fases: partículas de agregado dispersas na matriz de cimento.
- No nível microscópico surge uma 3ª fase: a zona de transição, região interfacial entre as partículas do agregado e a pasta, com espessura de 10 a 50 μm .
- Tanto pasta quanto zona de transição variam com o tempo, umidade ambiente e temperatura

Estrutura da Fase Agregado

- É responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional do C.
- Por sua vez, estes dependem da densidade e da resistência do agregado, além do volume, tamanho e distribuição de poros.
- Finalmente, também contribuem a forma e a textura do agregado.

Estrutura da Pasta Endurecida (1)

- O C é um pó cinza composto por partículas angulares de tamanho entre 1 e 50 μm .
- É produzido por moagem do clínquer com uma pequena quantia de sulfato de cálcio.
- O clínquer é uma mistura produzida por reações em alta temperatura entre óxido de cálcio, sílica, alumina e óxido de ferro.
- Sua composição química é: C3S(45 a 60%), C2S(15 a 30%), C3A(6 a 12%) e C4AF(6 a 8%)

Sólidos na Pasta de Cimento Hidratado

- Abreviaturas: C = CaO, S = SiO₂, A = Al₂O₃, F = Fe₂O₃, \bar{S} = SO₃ e H = H₂O.
- C-S-H = silicato de cálcio hidratado em 50 a 60% do volume de sólidos;
- Ca(OH)₂ = hidróxido de cálcio em 20 a 25%;
- C₆A \bar{S} H₃2 = trissulfato hidratado, conhecido como etringita, que pode transformar-se em C₄A \bar{S} H₁8, monossulfato hidratado, ambos classificados como sulfoaluminatos de cálcio.
- Grãos de clínquer não-endurecidos.

Vazios na Pasta Endurecida

1. 1cm^3 de cimento anidro requer 2cm^3 de espaço para acomodar os produtos da hidratação.
2. Espaço interlamelar no C-S-H: 0,5 a 2,5 nm;
3. Vazios capilares: 10 a 50 nm em pastas bem hidratadas e com A/C baixo, mas 3000 a 5000 nm em A/C alto. Segundo Metha até 50 nm são denominados microporos e acima disto, macroporos. Os microporos são responsáveis pelos fenômenos de retração por secagem e fluência e os macroporos o são para resistência e impermeabilidade;
4. Ar incorporado: esféricos com 50 a 200 μm ;
5. Ar aprisionado: 0,2 mm a 3 mm.

Água na Pasta Endurecida

- Água capilar livre em $\varnothing > 50 \text{ nm}$;
- Água capilar cuja remoção pode causar retração:
 $5 \text{ nm} < \varnothing < 50 \text{ nm}$;
- Água adsorvida em $1,5 \text{ nm} < \varnothing$: tem importância na retração da pasta por secagem;
- Água interlamelar está associada ao C-S-H;
- Água quimicamente combinada

Porosidade

- É o agente físico de controle da taxa de deterioração e representa uma característica diretamente relacionada à relação água/cimento, ao tipo de cimento e ao grau de hidratação do concreto.
- Também ligada às características dos poros, entre elas, seu diâmetro, conectividade e seu volume total, à variação dimensional dos sólidos e dos poros de uma pasta de cimento endurecida, bem como a sua classificação.

Porosidade (2)

- Helene (1993) esclarece a importância dos tipos de poros na durabilidade do concreto, classificando-os em: macroporos 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, para um mesmo tipo de cimento, a relação água/cimento é o agente controlador da porosidade e, quanto maior relação A/C, maior a porosidade resultante.
- Da mesma forma, é importante considerar que, além do tamanho dos poros, a conectividade entre estes é de grande influência, ou seja, mesmo poros de elevado diâmetro, considerados macroporos, só terão influência na penetração de agentes agressivos na estrutura, se estiverem conectados entre si, formando canais de acesso para os agentes agressivos penetrarem.

Permeabilidade

- De acordo com Schiessl (1987), os macroporos são os mais importantes para a durabilidade do concreto
- De acordo com Uchikawa (1986), a permeabilidade do concreto à água encontra-se relacionada ao volume de poros com diâmetro superior a 132 micrômetros
- 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

Relação entre Permeabilidade e Porosidade

- À medida que se hidratam, os espaços vazios do cimento vão sendo preenchidos pelos produtos da hidratação;
- Segundo Metha, a permeabilidade de uma pasta ($A/C=0,7$) completamente hidratada tem coeficiente de permeabilidade de $6 \text{ cm/s} \times 10$ elevado a -11 enquanto que a mesma pasta fresca tinha 2 cm/s elevado a -4 ;

Zona de Transição no Concreto

- Estrutura: no C 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. Em consequência, dá-se a formação de etringita e hidróxido de cálcio, mais porosos que na matriz.
- 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.

Absorção Capilar

- Absorção capilar é a medida do fluxo em materiais não saturados, o que normalmente ocorre com as estruturas de concreto
- Para casos de concretos sujeitos a ciclos de molhagem e secagem, por se tratar de transporte d'água em vazios não saturados, a absorção capilar pode ter grande influência no transporte de água no interior das estruturas

Migração Iônica

- Segundo Cascudo é a movimentação de íons que se dá pela corrente gerada pela ação de campos elétricos decorrentes da corrente elétrica existente no processo eletroquímico
- Como forma de controle desta característica dos concretos, vários autores sugerem o uso de adições minerais, as quais segundo Regatieri, reduzem significativamente a taxa de penetração de íons no concreto.

Deformações nos Elementos Estruturais

- 1. Deformações no Concreto
- 2. Deformações na Armadura

Efeito do Tempo no Concreto Estrutural Anexo A – NBR-6118

1. Deformações no Concreto



Deformações do Concreto

Sem impedimentos à sua livre deformação, tendo sido aplicada tensão em t_0 , no instante t teremos:

$$\varepsilon_c(t) = \varepsilon_c(t_0) + \varepsilon_{cc}(t) + \varepsilon_{cs}(t)$$

$\varepsilon_c(t_0) = \sigma_c(t_0) / E_{ci}(t_0)$ é a deformação imediata com
 $E_{ci}(t_j) = 5600 \sqrt{f_{ckj}}$

$\varepsilon_{cc}(t) = [\sigma_c(t_0) / E_{ci28}] \cdot \varphi(t, t_0)$ é a deformação por fluência

$\varepsilon_{cs}(t)$ é a deformação por retração em $(t - t_0)$

Fluência do concreto (ϵ_{cc})

Δ rápida é irreversível e ocorre em 24h após aplicação da carga = ϵ_{cca}

Δ lenta = ϵ_{ccf} (irreversível) + ϵ_{ccd} (reversível)

Portanto: $\epsilon_{cc} = \epsilon_{cca} + \epsilon_{ccf} + \epsilon_{ccd}$

ou: $\epsilon_{cc} = \epsilon_c (1 + \varphi)$,

onde $\varphi = \varphi_a + \varphi_f + \varphi_d$

Hipóteses para Fluência

- ϵ_{cc} varia linearmente com a σ aplicada
- $\Delta\sigma$ em t distintos: $\Delta\epsilon$ superpõem-se
- ϵ_{cca} constante no tempo
- ϵ_{ccd} depende duração do carregamento
- ϵ_{ccf} depende da umidade relativa, da consistência do C, da espessura fictícia, da idade fictícia na aplicação da carga e da idade fictícia no instante considerado

Valor da Fluência

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varepsilon_{cca} + \varepsilon_{ccf} + \varepsilon_{ccd} = [\sigma_c / E_{c28}] \cdot \varphi(t, t_0)$$

$$\text{onde } \varphi(t, t_0) = \varphi_a + \varphi_f^\infty [\beta_f(t) - \beta_f(t_0)] + \varphi_d^\infty \beta_d$$

t (dias) = idade fictícia no instante considerado

t_0 (dias) = idade fictícia ao ser feito o carregamento

$$\varphi_a = 0,8 [1 - f_c(t_0) / f_c(t^\infty)]$$

$\varphi_f^\infty = \varphi_{1c} \cdot \varphi_{2c}$, sendo φ_{1c} função da umidade do ambiente e da consistência do C – Tab A.1

e sendo $\varphi_{2c} = (42 + h_{fic}) / (20 + h_{fic})$, sendo h_{fic} em cm

$\beta_f(t)$ e $\beta_f(t_0)$ é função da idade do C, cf Fig.A.2

$$\varphi_d^\infty = 0,4$$

$$\beta_d(t) = (t - t_0 + 20) / (t - t_0 + 70)$$

Retração do Concreto

□ Depende da umidade relativa do ambiente, da consistência do C no lançamento e da espessura fictícia da peça

□ $\epsilon_{cs}(t,t_0) = \epsilon_{cs\infty}[\beta_s(t) - \beta_s(t_0)]$, onde:

$\epsilon_{cs\infty} = \epsilon_{1s} + \epsilon_{2s}$, sendo ϵ_{1s} obtido da Tab. A.1 e

$\epsilon_{2s} = [(33 + 2h_{fic}) / (20,8 + 3h_{fic})]$, para h_{fic} em cm

□ $\beta_s(t)$ e $\beta_s(t_0)$ são obtidos na Fig. A.3

Idade fictícia do C

- $t = \alpha \sum [(\Theta_i + 10)/30] \Delta t_{ef,i}$, onde:

α depende da velocidade de endurecimento do cimento. É dado pela Tab. A.2

Θ_i é a temperatura média diária, em °C

$\Delta t_{ef,i}$ é o período, em dias, durante o qual a Θ_i pode ser admitida constante

Espessura fictícia da peça

- $h_{fic} = \gamma \cdot 2A_c / u_{ar}$, onde:

γ depende da umidade relativa do ambiente. É dado na Tab. A.1

A_c é a área da seção transversal da peça

u_{ar} é a parte do perímetro externo da peça em contato com o ar atmosférico

Contração Térmica por Resfriamento

- É a deformação de contração associada ao resfriamento e depende do coeficiente de dilatação térmica do C e da $\Delta\Theta$.
- Estruturas de grande porte devem ter especial atenção às formas de dissipação do calor gerado pela reações exotérmicas da hidratação dos sais do cimento.
- Segundo METHA, para $\Delta\Theta = 15^\circ\text{C}$ de calor de hidratação, $\alpha = 10^{-5}/^\circ\text{C}$ e $E = 21 \text{ GPa}$, teremos $\sigma_t = \Delta\Theta \cdot \alpha \cdot E = 3,1 \text{ MPa} > \sigma_t \text{ adm.}$

Controle das Tensões Térmicas

- Diminuir o grau de restrição da estrutura;
- Pré-resfriamento do C fresco por agregados resfriados ou escamas de gelo para C-massa;
- Utilizar cimentos de grãos mais grossos e com baixos teores de C3A e C3S;
- Inclusão de material pozolânico como adição;

Efeito do Tempo no Concreto Estrutural

Anexo A – NBR-6118

2. Deformações na Armadura



Deformações na Armadura

- $\epsilon_s(t) = [\sigma_s(t_0)/E_s][1 + \chi(t, t_0)]$, onde:

$\chi(t, t_0)$ é o coeficiente de fluência e considerado sempre que $\sigma_s(t_0) > 0,5 f_{ptk}$

Bibliografia

- Boletim 183/89 do CEB
- NBR 6118/03
- Concreto, estrutura, propriedades e materiais, K. Metha e P. Monteiro - 1995
- Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de concreto – V. Custódio e T. Ripper - 1998

Sessão encerrada
Obrigado a todos

Eng^o Marcelo Iliescu
iliescu@iliescu.com.br
www.iliescu.com.br