

BOLETIM TÉCNICO Nº 1

RESUMO BIBLIOGRÁFICO

DISCIPLINA PATOLOGIAS DAS CONSTRUÇÕES/IFS

TEMA

**DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO
ARMADO CONVENCIONAIS**

ASSUNTO

POROSIDADE DOS CONCRETOS

RTB/01

PROFESSOR CARLOS HENRIQUE DE CARVALHO

1. INTRODUÇÃO

A Durabilidade das Estruturas de Concreto Armado, quando evidentemente assegurados os ELU e ELS respectivos, é a ênfase tecnológica do momento nesse mister face, entre outras, razões econômicas, de sustentabilidade e a força jurídica da presunção de regularidade emanada da NBR 15.575/2013 através da Doutrina de Vida Útil para Bens Duráveis. O requisito normativo determina uma vida útil mínima de cinquenta anos para a superestrutura e a literatura internacional tecnológica apregoa o mínimo de setenta anos para as fundações prediais.

Nesse contexto tecnológico atual, torna-se imperioso aos projetistas e construtores uma concepção e produção de concretos para, além de **Resistentes Física e Mecanicamente**, também **Resistentes à Penetração de Agentes Agressivos**. Para isso, somente os requisitos agregados na NBR 6118/2014 não creio suficientes, apesar de necessários, à garantia da Vida Útil exigida na NBR 15575/2013. Pois, além da avaliação dos microclimas representados pelas quatro classes de agressividades, da espessura do cobrimento e do fator a/c, torna-se imprescindível a produção de um concreto cuja propriedade de **permeabilidade aos gases e líquidos no cobrimento seja capaz de dificultar os mecanismos de transportes desses agentes**, tais como oxigênio, umidade, CO₂, íons cloretos e outros. Portanto, fica evidente a importância do estudo da **POROSIDADE**.

Entre os diversos parâmetros envolvidos nos processos de deterioração do concreto, a **POROSIDADE** se destaca como um dos principais agentes condicionantes da vulnerabilidade do concreto ao ataque por processos químicos e físicos.

Ensaio são incorporados no cotidiano dos estudos de traços dos concretos além daqueles convencionais há tempos praticados.



Fig. 1. Ensaio de Porosidade

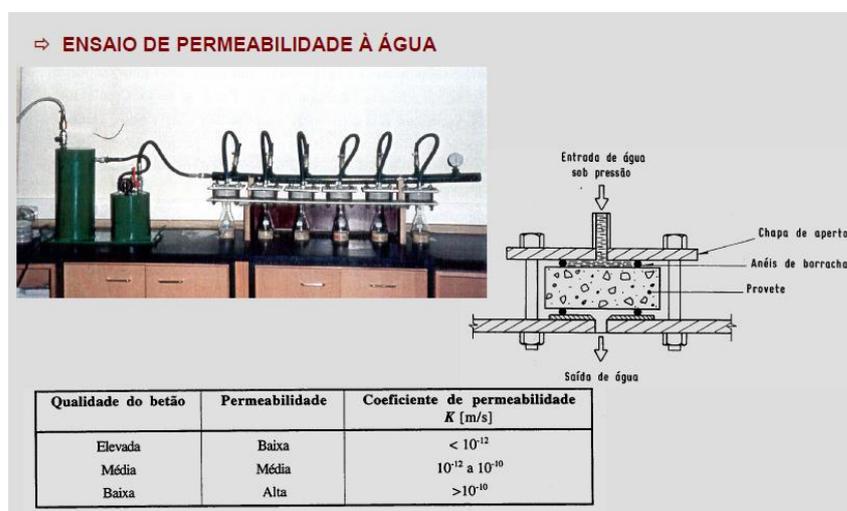


Fig. 2. Ensaio de Permeabilidade

⇒ **ENSAIO DE DIFUSÃO AOS CLORETOS**

ENSAIO DE MIGRAÇÃO (Luping)



Fig. 3. Ensaio de Difusividade de Cloretos

⇒ **ANÁLISE PETROGRÁFICA**

Princípio – Execução de lâminas delgadas de betão para análise ao microscópio

Aplicações :

- avaliação da qualidade e composição do betão.
- identificação de deterioração química do betão,....

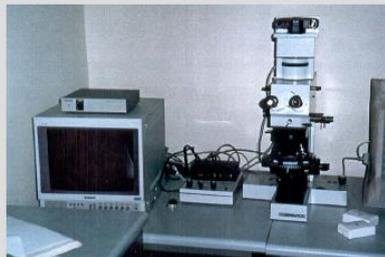
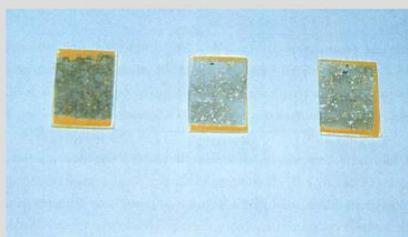


Fig. 4. Ensaio na Microestrutura

⇒ **ULTRASSONS**

Princípio – Medição do tempo que uma onda sonora de alta frequência leva a percorrer uma distância no interior do betão entre a fonte emissora e a fonte receptora (calculando-se a velocidade de propagação das ondas no interior do betão)

Aplicações:

- avaliação da qualidade e uniformidade do betão
- estimativa da resistência à compressão do betão e módulo de elasticidade
- localização de vazios e fendas no interior do betão

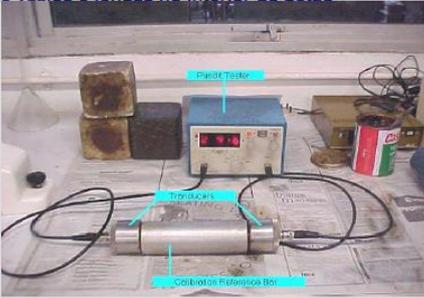
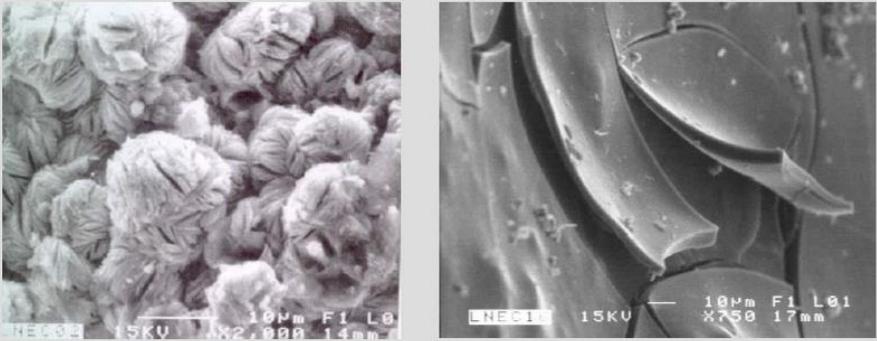


Fig. 5. Ensaio com Ultrassom

Métodos de detecção da reacção: métodos microscópicos (MEV)



MEV (2000x)

MEV (750 x)

Fig. 6. Ensaio na Microestrutura com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)

Importantes autores e entidades estudaram o assunto da porosidade nos concretos. A seguir, estão postadas algumas de suas considerações pertinentes ao tema.

1. THOMAS DYER – A DURABILIDADE DO CONCRETO – EDITORA CIÊNCIA MODERNA, 2015.

Na página 306, ítem 5.2, Concreto como meio permeável, assim textualiza:

" O concreto é feito de partículas cuja distribuição de tamanhos cobre uma ampla faixa. Depois de produzido parece ser uma peça monolítica, entretanto muitos dos espaços entre partículas permanecem formando uma rede interconectada ou não de poros. Essa rede porosa permite, até certo ponto, que substâncias penetrem no concreto e se movam através desses espaços. As fissuras também causam caminhos abaixo da superfície do concreto."

5.2.1 POROSIDADE

Sabe-se que o concreto é um material heterogêneo e poroso, portanto com espaços vazios no seu interior. Em circunstâncias normais a maior parte da porosidade está na matriz do cimento.

Divide-se, conforme os diâmetros, em **POROSIDADE CAPILAR**, **POROSIDADE DE GEL** e **POROSIDADE NA ZONA DE TRANSIÇÃO**.

*"A **POROSIDADE CAPILAR** é o espaço deixado entre partículas de cimento, e tipicamente tem dimensões em torno da ordem de $1\mu\text{m}$ de diâmetro.*

*A **POROSIDADE CAPILAR** é influenciada principalmente pelo fator a/c da mistura do concreto; do grau de hidratação do cimento e da distribuição de tamanhos de partículas do cimento. Quanto maior o volume de água em relação ao do cimento, maior o espaço entre as partículas de cimento, portanto maior a Porosidade.*

A reação de cimento com água causa a formação de produtos de hidratação nas superfícies dos grãos de cimento, enquanto o diâmetro dos grãos que não passaram pela reação diminui.

ASSIM, UM FATOR a/c BAIXO E UM ALTO GRAU DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO LEVAM A VOLUMES MENORES DE POROSIDADE TOTAL E MENORES DIÂMETROS DE POROS (Fig.7)."

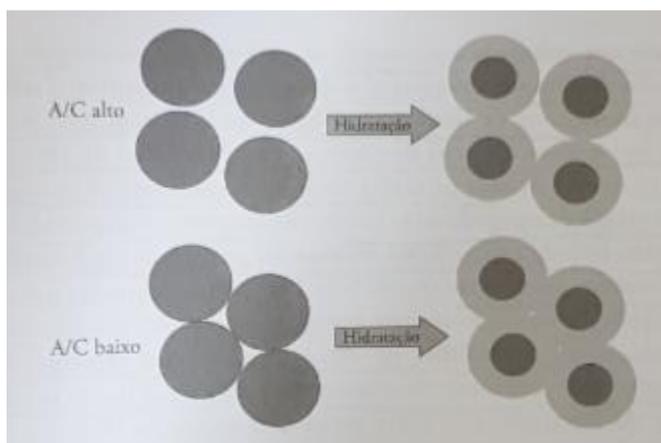


Fig. 7. Influência do fator a/c e a hidratação

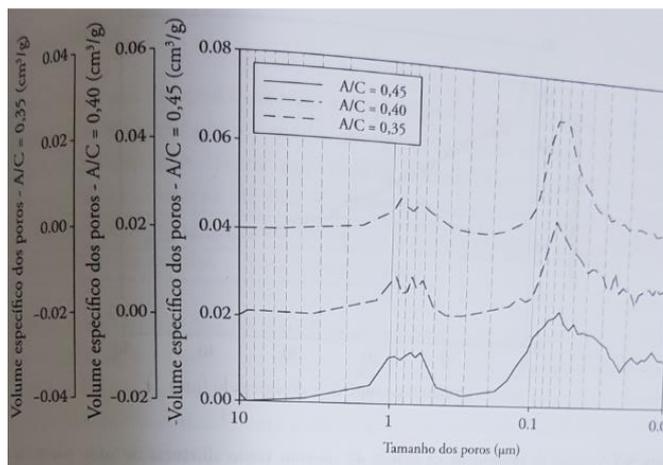


Fig. 8 A influência do fator a/c na porosidade capilar. Dyer, T.

“O TAMANHO DAS PARTÍCULAS DO CIMENTO também desempenha papel importante, uma vez que partículas maiores têm volumes maiores de porosidade capilar e diâmetros de poros maiores.

A presença de partículas menores nos espaços entre partículas maiores atua para “refinar” a porosidade.”

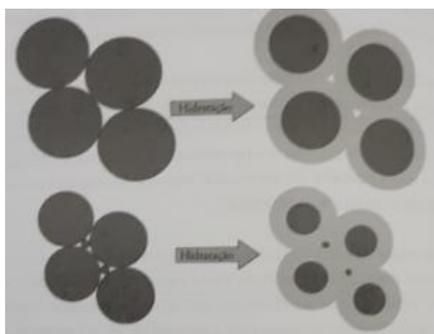


Fig. 9. Influência do tamanho das partículas na porosidade capilar. Dyer, T.

POROSIDADE DE GEL

À medida que a hidratação do cimento continua, acontece o aumento da **POROSIDADE DO GEL** (CSH, silicato de cálcio hidratado) enquanto diminui a **POROSIDADE CAPILAR**.

POROSIDADE DA ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL (ZTI)

“A interface entre a pasta de cimento e as partículas de agregados influencia a porosidade do concreto. Essa região tem uma porosidade mais alta que a massa da pasta de cimento. Isso é resultado do EFEITO PAREDE onde partículas de cimento localizadas contra a superfície de uma partícula de agregado estão menos eficientemente comprimidas que em outras partes, levando a um volume mais alto de porosidade capilar e diâmetros de poros maiores nessa região. Outra característica do efeito parede é que as partículas menores normalmente estão presentes em maiores proporções e em maior proximidade da parede.”

“Embora a ZTI contribua para as propriedades de permeação do concreto, estudos de sua influência geral comparada com a da porosidade do cimento e de microfissuras indicam que essa contribuição é relativamente pequena.”

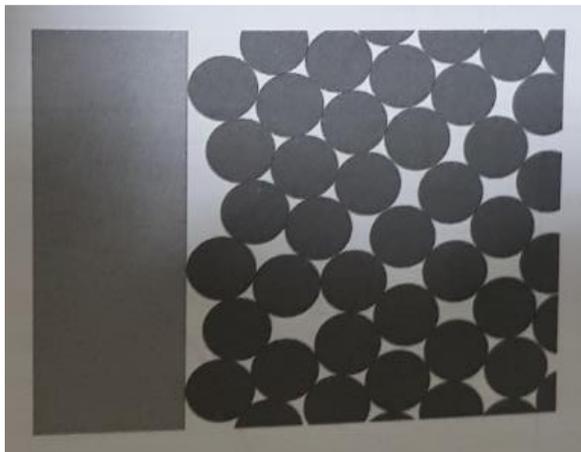


Fig. 10. Efeito Parede na ZTI

5.1.2 BIBLIOGRAFIA

DYER, THOMAS. A DURABILIDADE DO CONCRETO. Editora Ciência Moderna. www.lcm.com.br, fone (21) 2201 6662, RJ.

2. CEB – COMITE INTERNATIONAL DU BETON 183 DURABLE CONCRETE STRUCTURES – 1992

CAPÍTULO 2 – MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO

Os fatores dominantes envolvidos na maioria dos processos químicos e físicos que influenciam a **Durabilidade das Estruturas de Concreto** são: **O TRANSPORTE DENTRO DOS POROS e FISSURAS bem como a ÁGUA.**

Conforme relatado no artigo intitulado **Porosidade do Concreto determinada por Microtomografia com Raios X e Processamento de Imagens**, observou-se também que **QUANTO MENOR FOR O TAMANHO DOS POROS, MAIS FAVORECIMENTO À RESISTÊNCIA DO CONCRETO EXISTIRÁ.**

O transporte de gases, de água e os agentes agressivos dissolvidos bem como os mecanismos de ligação são elementos importantes que também influenciam a Durabilidade dos Concretos.

A taxa, a extensão e o efeito do transporte dependem em grande parte da estrutura dos poros, das fissuras e do microclima na superfície do concreto. Nesse contexto, estrutura porosa significa a quantidade de poros e a distribuição do tamanho dos poros (distribuição dos diâmetros).

A estrutura dos poros, a configuração das fissuras e os seus preenchimentos com água são fatores determinantes no que diz respeito ao transporte de água e substâncias gasosas dissolvidas. Além disso, a taxa de transporte depende consideravelmente do seu mecanismo.

No caso de estarem envolvidos mecanismos de ligações químicas, a composição química do cimento e as propriedades dos agregados também são importantes.

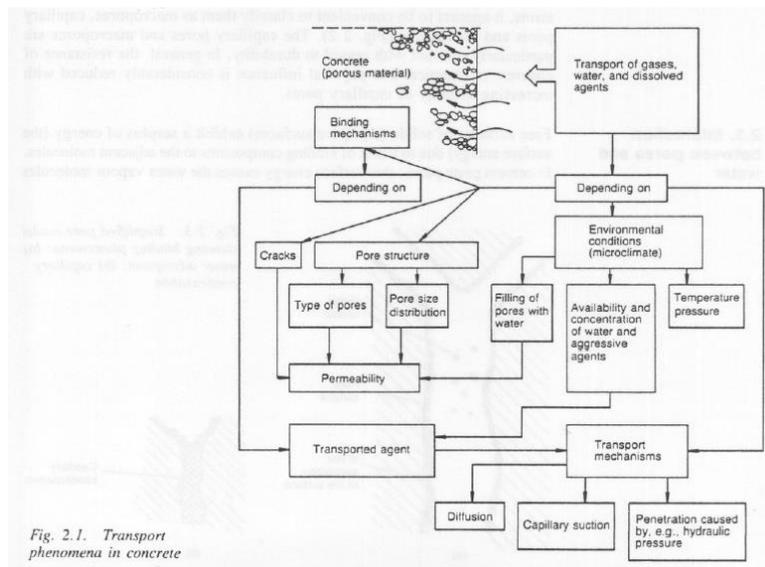


Fig.11. Mecanismos de Transportes nos Concretos

Além do microclima, a **PERMEABILIDADE** é decisivamente influenciada pela estrutura de poros da pasta de cimento. Para uma caracterização da estrutura de poros abertos no que diz respeito ao transporte da substância para dentro e dentro dos materiais de construção porosos, dois parâmetros serão importantes: **POROSIDADE ABERTA E DISTRIBUIÇÃO DO TAMANHO DOS POROS**.

POROSIDADE ABERTA significa poros que estão interligados de modo que o transporte de líquidos ou gases e ou a troca de substâncias dissolvidas é possível. Corresponde ao teor máximo de água reversível e, no caso da pasta de cimento, situa-se na faixa dos 20-30%.

A distribuição do tamanho dos poros influencia particularmente a taxa de transporte. Os tamanhos dos poros na pasta de cimento variam em várias ordens de grandeza.

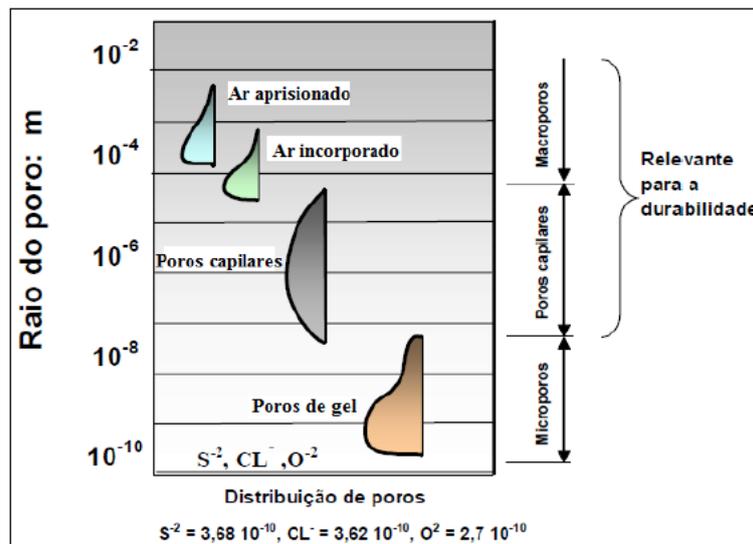
De acordo com a origem e características, os poros são descritos como: **POROS DE COMPACTAÇÃO, POROS DE AR, POROS CAPILARES OU POROS DE GEL**.

Expresso em termos mais gerais, parece ser conveniente classificá-los como **MACROPOROS, POROS CAPILARES E MICROPOROS**. Os **POROS CAPILARES E MACROPOROS** são particularmente relevantes no que diz respeito à **DURABILIDADE** (Fig. 2.2).

EM GERAL, A RESISTÊNCIA DO CONCRETO À INFLUÊNCIA QUÍMICA E FÍSICA É CONSIDERAVELMENTE REDUZIDA COM O AUMENTO DA QUANTIDADE DE POROS CAPILARES.

A figura a seguir mostra a distribuição desses poros.

Fig. 12. Distribuição do tamanho dos poros na pasta de cimento



Fonte: Modificado SIEBEERT apud FREIRE (2005).

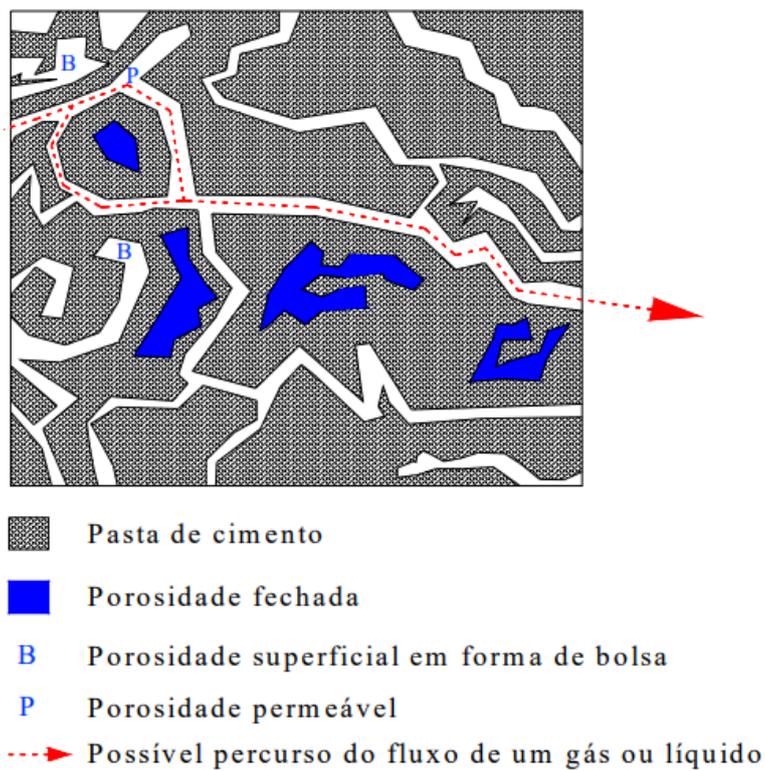


Fig. 13. Rede de Poros
Fonte: Mopt apud Figueiredo (1994)

MARTYS (1997), ressalta que os **POROS CAPILARES** são os maiores responsáveis pela ação de agentes agressivos nas estruturas de concreto.

Como citado anteriormente, uma elevada relação água/cimento resulta em grande quantidade de poros no cimento fazendo com que os agentes agressivos cheguem com mais facilidade à armadura. Assim, segundo SATO (1998), modificar a taxa de porosidade do concreto pode ser uma solução econômica e eficiente para aumentar a durabilidade do concreto armado.

Essa **POROSIDADE** pode ser medida não só pelo volume de vazios na massa endurecida, mas também pelo tipo, tamanho e distribuição desses poros.

Um dos métodos usados, além da diminuição da relação a/c, é o emprego de adições minerais ao cimento, como as pozolanas e a escória de alto-forno, que permitem a obtenção de concretos com poros de dimensões menores. A baixa porosidade proporciona ainda um aumento na resistência mecânica do concreto, uma vez que a estrutura se apresenta mais homogênea e menos sujeita às situações de concentração de tensões, considerando então, fator importante na durabilidade.

Já MEHTA e MONTEIRO (1994) classificam os poros em duas classes: **MACROPOROS E MICROPOROS**. Segundo eles, **MACROPOROS** são aqueles maiores que $0,05\ \mu\text{m}$ e **MICROPOROS** menores que $0,05\ \mu\text{m}$.

Ainda segundo estes autores, os **MACROPOROS INFLUENCIAM NA RESISTÊNCIA** e na **PERMEABILIDADE**, enquanto os **MICROPOROS** influenciam na **RETRAÇÃO E NA FLUÊNCIA**.

Porém, segundo ALDEA et al (2000), somente os poros com diâmetro acima de $0,12\ \mu\text{m}$ a $0,16\ \mu\text{m}$ são relevantes para a permeabilidade.

De acordo com SILVEIRA (2004), os poros responsáveis pela **PERMEABILIDADE** são os **MACROPOROS** interconectados que formam uma rede de poros conhecida como **POROSIDADE ABERTA** do concreto.

A CEB (1992) ressalta a importância do controle desses fatores já que o transporte de água no concreto é determinado pelo tipo, tamanho e distribuição dos poros.

2.1 INTERAÇÃO ENTRE POROS E ÁGUA

Superfícies livres de sólidos (por exemplo, superfícies de poros) exibem um excedente de energia (a energia da superfície) devido à falta de componentes de ligação às moléculas adjacentes. Em poros de pasta de cimento essa energia superficial faz com que as moléculas de vapor de água dentro dos poros sejam absorvidas sobre a superfície desses poros sendo que a espessura do filme de água formado é dependente do grau de umidade dentro deles. A Fig. 14 seguinte ilustra o texto.

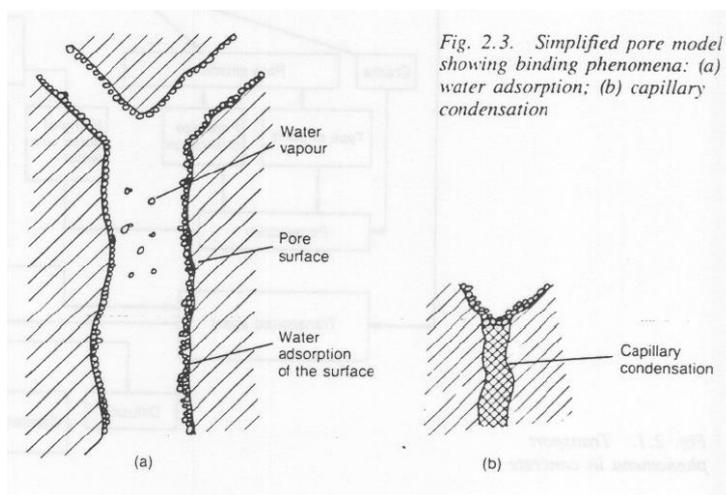


Fig. 14. Interação entre poros e água

Devido ao fato de que a **RELAÇÃO ENTRE A ÁREA DE SUPERFÍCIE E O VOLUME DOS POROS AUMENTA COM A DIMINUIÇÃO DO RAIO DE POROS**, A QUANTIDADE DE ÁGUA ADSORVIDA NA SUPERFÍCIE DO PORO AUMENTARÁ EM RELAÇÃO AO VOLUME DE POROS até um certo determinado valor limite do raio de poros, onde os poros com menores raios estarão completamente cheios de água. Esse processo é chamado de **CONDENSAÇÃO CAPILAR (Fig.14, b)**.

OBS. Superfície dos poros é $2\pi R \times 1 = 2\pi R$ / volume dos poros é $\pi R^2 \times 1 = \pi R^2$
 Relação entre a área da superfície dos poros/volume dos poros é $2\pi R/\pi R^2 = 2/R$.
 Portanto, aumentando o raio do poro a relação diminui; DIMINUINDO O RAIO DO PORO, A RELAÇÃO AUMENTA.

O valor limite do raio de poros depende principalmente do teor de água do ar nesse poro que, sendo todo o resto constante, é proporcional à umidade do ar que envolve o concreto.(Fig. 15).

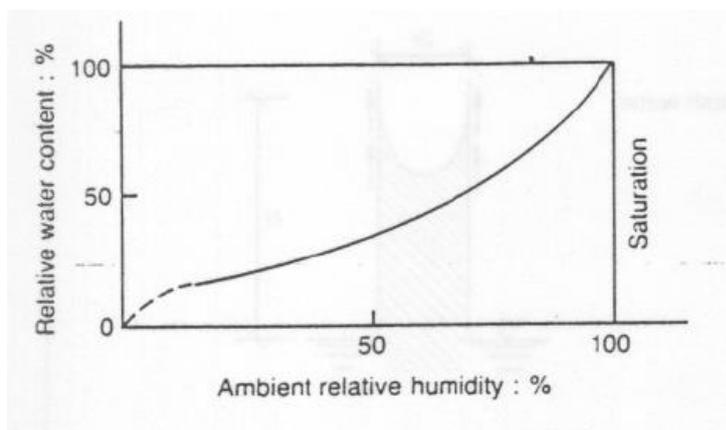


Fig. 2.4. Relationship between relative humidity of ambient air and concrete, relative to saturation

Fig. 15. Relação entre umidade relativa do ambiente e no concreto

Observa-se no gráfico, por exemplo, que para um conteúdo no concreto de 50% da sua saturação, necessita de uma umidade relativa do ar ambiental acima dos 70% dessa saturação ambiental.

COMO RESULTADO DA ELEVADA PROPORÇÃO E DOS PEQUENOS RAIOS DOS POROS DE GEL, O CONCRETO EXIBE

UM TEOR COMPARATIVAMENTE ELEVADO DE ÁGUA MESMO QUANDO A HUMIDADE DO AR CIRCUNDANTE É RELATIVAMENTE BAIXA.

AUMENTAR A UMIDADE DO AR FARÁ COM QUE OS POROS MAIORES SEJAM PREENCHIDOS COM ÁGUA, REDUZINDO ASSIM O ESPAÇO DE POROS DISPONÍVEIS PARA A DIFUSÃO DE GASES.

Conseqüentemente, a permeabilidade do concreto relativamente a gases diminuirá consideravelmente com o teor crescente de água e, no caso de um concreto quase saturado de água, a difusão de gases (por exemplo dióxido de carbono e oxigênio) torna-se praticamente desprezável.

2.2 MECANISMO DE TRANSPORTE NO AR ÚMIDO

Como descrito acima, os poros maiores no concreto cercados de ar ambiental são preenchidos com esse ar dependendo da umidade. A superfície destes poros é revestida com um filme de água ligado por adsorção (Fig. 14,a). Qualquer processo de transporte de gases, água ou substâncias dissolvidas na água são processos de difusão sob essas condições ambientais. **OS PROCESSOS DE DIFUSÃO SÃO INDUZIDOS PELA TENDÊNCIA DE DIFERENÇAS NAS CONCENTRAÇÕES PARA EQUILIBRAR (FIG. 16).**

Fig. 2.5 (right). Diffusion through a porous material. The driving force is the difference between c_1 and c_2 , where these are the concentrations (or partial pressures or pressures) of water, carbon dioxide, oxygen, chloride ions and so on

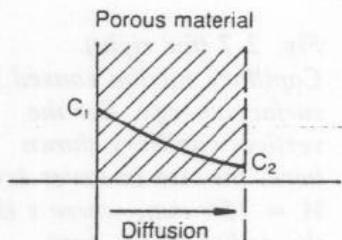


Fig. 16. Difusão nos poros

O dióxido de carbono difunde-se no concreto devido a uma reação química entre o dióxido de carbono e o concreto que se desenvolve nas paredes dos poros, o que faz com que a concentração dentro dos poros seja reduzida. Um processo similar se aplica ao oxigênio quando é consumido durante a corrosão do reforço.

A DIFUSÃO DE ÁGUA OU VAPOR DE ÁGUA sempre ocorrerá quando a umidade do ambiente mudar ou quando o concreto estiver secando.

A difusão de substâncias dissolvidas em água (por exemplo, íons cloreto) se desenvolverá no filme de água na superfície do poro ou nos poros preenchidos com água. Devido à diminuição da espessura do filme e à proporção decrescente de poros preenchidos com água, respectivamente, a taxa de difusão de substâncias dissolvidas na água será substancialmente reduzida com a diminuição do teor de umidade do concreto.

2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE: CHUVA E RESPINGOS DE ÁGUA

No caso de molhamento de superfícies de concreto (por exemplo, chuva e respingos de água), o transporte de água é de grande importância (Fig. 17). Por causa da sucção capilar, a saturação será rapidamente alcançada. Solutos são transportados pela água; a difusão de gases é prática e totalmente impedida. Somente quando o transporte de água entra em repouso, aproximando-se de um estado de equilíbrio, a difusão desempenha novamente um papel dominante.

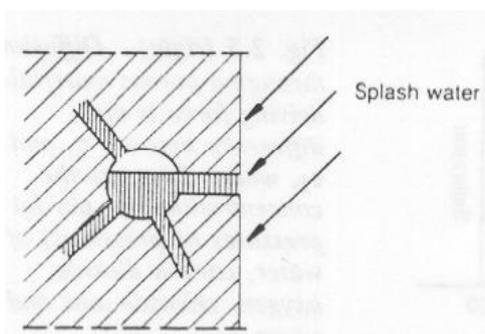


Fig. 17. Modelo de poros com água de chuvas

O efeito da sucção capilar depende da energia superficial da superfície do poro, como descrito na seção 2.3. A tendência de absorver água na superfície resultará, no caso de um excedente de água, no início da sucção. A altura do aumento capilar nos capilares verticais é determinada por um equilíbrio entre as forças de ligação da superfície e o peso da coluna de água no capilar (Fig. 18). No que se refere à sucção na direção horizontal, a profundidade da penetração dependerá principalmente do excesso de água na superfície do concreto e da duração dessa situação.

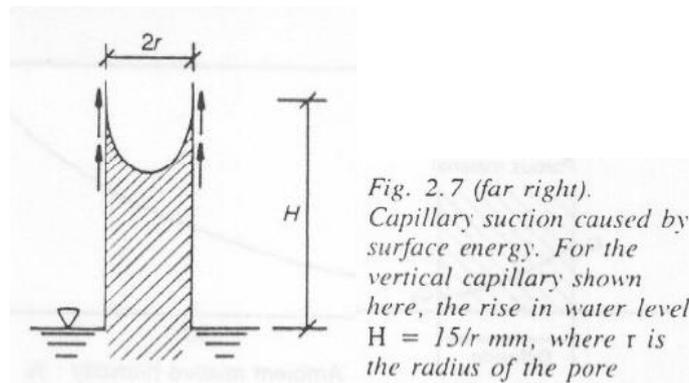


Fig. 18. Sucção capilar

Sucção capilar causada pela energia superficial. Para o capilar vertical mostrado aqui, o aumento do nível de água $H = (15 / r)$ mm, onde r é o raio do poro. **A ÁGUA É ABSORVIDA PELO CONCRETO ATRAVÉS DA SUCÇÃO CAPILAR e é CONSIDERAVELMENTE MAIS ALTA DO QUE A DESCARTADA PELA EVAPORAÇÃO (Fig. 2.8).**

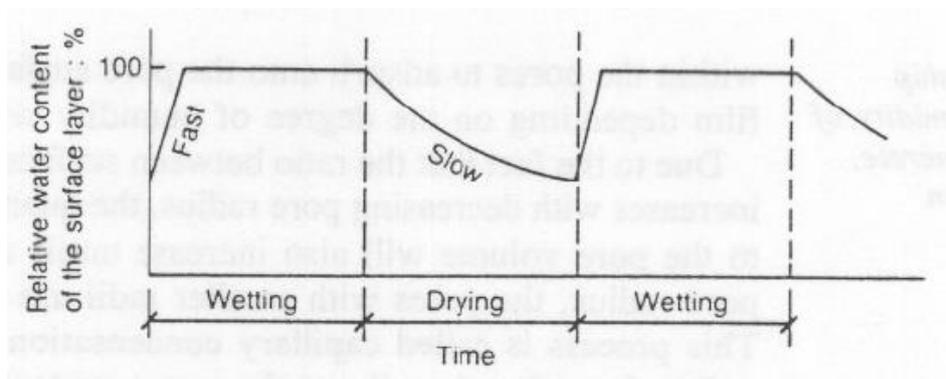


Fig. 2.8. Changing wetting and drying of the surface layer

Fig. 19. Sucção capilar no tempo

2.4 MECANISMO DE TRANSPORTE: IMERSÃO

No caso de estruturas continuamente imersas, grandes quantidades de água podem, sob condições desfavoráveis, ser transportadas. A penetração da água ocorrerá primeiro por sucção capilar, possivelmente acelerada por um aumento da pressão hidráulica. O transporte contínuo de água só se desenvolverá quando a água se evaporar nas superfícies de concreto expostas ao ar. A intensidade deste transporte de água depende da relação entre a evaporação, as aspirações capilares e a pressão hidráulica (Fig. 20).

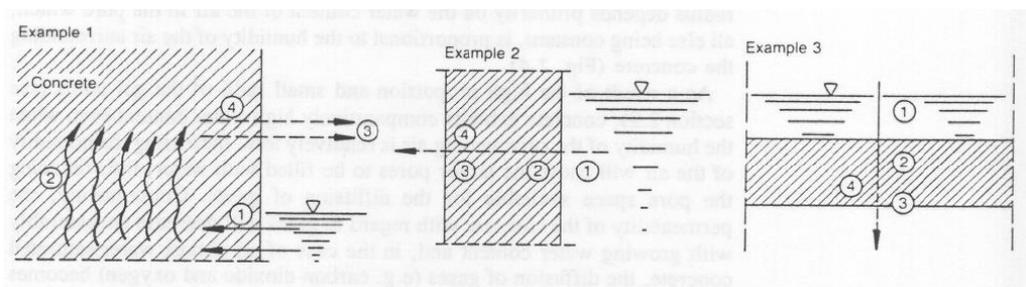


Fig. 2.9. Immersion of concrete in water: 1 = water transport by hydraulic pressure and capillary suction; 2 = transport of water and dissolved agents; 3 = evaporation of water; 4 = crystallization of solutes, giving enrichment in the evaporation zone

Fig. 20. Imersão do concreto na água

Juntamente com a água, os agentes dissolvidos (por exemplo, carbonatos, cloretos e sulfatos) serão transportados. No entanto, esses agentes são deixados para trás no concreto na região de evaporação, onde é provável que desenvolvam concentrações consideráveis. **FENÔMENOS DE EFLORESCÊNCIA** podem ser devidos a este efeito: os agentes dissolvidos recristalizam nas superfícies de concreto.

No concreto, as forças expansivas devido à cristalização do sal perto da superfície causam apenas pequenos problemas: mais importante é o efeito químico da concentração aumentada de substâncias agressivas. No entanto, outros materiais porosos, tais como o rebentamento de arenito, mármore ou alvenaria e descamação devido à cristalização do sal, são uma causa grave de deterioração e resultam na rápida deterioração de esculturas, monumentos, etc. expostos a ambientes agressivos.

DIFUSÃO TÉRMICA DO VAPOR DE ÁGUA EM MATERIAIS POROSOS: FATO OU FICÇÃO?

Esse documento resolve essa contradição. Uma análise crítica das investigações que sustentam a ocorrência da difusão térmica revela que todas são falhas. Uma reinterpretação correta de todas as medições permite concluir que nenhuma difusão térmica consistente ou significativa pode ser observada.

Isso traz essas investigações de acordo com seus oponentes anteriores. **Esta conclusão também concorda com a termodinâmica, que confirma a existência real da difusão térmica, mas também indica sua magnitude insignificante. Pode-se concluir que a difusão térmica não é importante para a construção de aplicações científicas, deixando a pressão de vapor como o único potencial de transporte significativo para a difusão de vapor de água em materiais porosos.**

Fonte: Artigo **THERMAL DIFFUSION OF WATER VAPOUR IN POROUS MATERIALS: FACT OR FICTION? 2011.**

À medida que o concreto é hidratado, os poros são reduzidos a tamanhos menores e assim dificulta a permeabilidade entre eles. O caminho que a água percorre nos poros é ilustrado na Fig. 13 anterior.

A classificação dos **POROS DA PASTA ENDURECIDA** pelo seu tamanho e a relação deles com a água estão na Tabela a seguir:

Quadro 1 – Tipos de poros

DESIGNAÇÃO	DIÂMETRO	DESCRIÇÃO	PAPEL DA ÁGUA	PROPRIEDADES DA PASTA AFETADAS
Poros capilares	10 µm a 50 nm	Capilares grandes	Comporta-se como água de amassamento	Resistência, permeabilidade
	50 a 10 nm	Capilares médios	Forças moderadas de tensão superficial	Resistência, permeabilidade, retração com altos teores de umidade
Poros do gel	10 a 2,5 nm	Capilares pequenos (gel)	Fortes forças de tensão superficial	Retração com 50% de UR
	2,5 a 0,5 nm	Microporos	Água fortemente adsorvida, sem formação de meniscos	Retração, fluência
	< 0,5 nm	Microporos interlamelares	Água estrutural das ligações	Retração fluência

Fonte: Mindess e Young (1981), pag. 99

O ensaio de porosidade, por sua vez, tem como objetivo determinar a absorção capilar, além da porosidade do concreto como medida de suas compacidade.

Um dos ensaios mais utilizados é o de **POROSIMETRIA POR INJEÇÃO DE MERCÚRIO** e é utilizado para caracterizar vários aspectos dos materiais porosos. Esse ensaio foi proposto por Washburn, que sugeriu ser possível obter a Distribuição de diâmetros de poros a partir dos dados de pressão e volume durante a penetração de um material poroso pelo mercúrio.

A técnica se baseia no fato de que o mercúrio se comporta como um fluido não molhante em relação à maior parte das substâncias. Por consequência, não penetra espontaneamente em pequenos furos ou fissuras destes materiais a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

Um dos métodos de ensaio utilizados para medir a **POROSIDADE SE CHAMA “ENSAIO DE POROSIDADE (POROSIDADE TOTAL)”**. Este ensaio resume-se em submergir uma amostra de concreto totalmente em água por 24 horas, no mínimo, e registrando ao final seu peso fora da água com uma balança (saturado de água) e dentro da água (submergido em água) com auxílio de uma balança hidrostática. Ao final, a amostra é seca a 105°C até atingir um peso constante, Que é também registrado. A **POROSIDADE TOTAL** em porcentagem é então calculada por meio da equação: (DURAR CYTED, 2000).

$$\% \text{ de porosidade total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{105^{\circ}\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{submergido}}} * 100$$

Esse ensaio também está inserido na ABNT NBR 9778 buscando a determinação do índice de vazios por equação equivalente:

$$\% = \frac{M_{\text{sat}} - M_{\text{s}}}{M_{\text{sat}} - M_{\text{i}}} * 100$$

Onde:

M_{sat} = massa do corpo de prova saturado;

M_{s} = massa do corpo de prova seco em estufa;

M_{i} = massa do corpo de prova saturado, imerso em água;

O resultado da equação pode ser comparado e analisado com a tabela abaixo:

Quadro 2 – Relação porosidade x Qualidade do concreto

Porosidade (%)	Qualidade do Concreto
≤ 10%	Boa qualidade e compacidade
10% - 15%	Moderada
≥ 15%	Durabilidade inadequada

FONTE: DURAR CYTED, 2000, Modificado por SILVA (2017)

Alguns ensaios a seguir ilustram a influência da POROSIDADE na Resistência à Penetração de Agentes agressivos via cobrimentos das armaduras dos concretos.

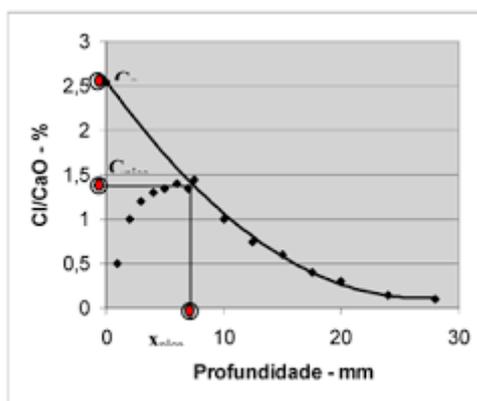


Fig. 21. Profundidade de cloretos x concentração
Fonte: Modificado Odd Gjørsv, 2015

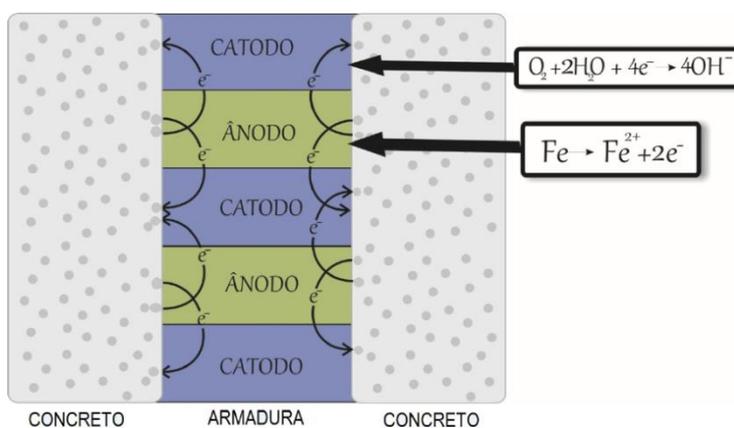


Fig. 22. Processo de corrosão eletroquímica nas armaduras dos concretos
Fonte: Ribeiro *et al*, 2014, p. 15.

O teor de umidade é o fator que mais influi na velocidade da corrosão. Se os poros estão saturados de umidade, ainda que a resistividade seja a menor possível, o oxigênio terá primeiro que se dissolver na água para poder alcançar a armadura. Já quando os poros contêm pouca umidade, a resistividade é muito elevada e o processo de corrosão é dificultado, como mostra a figura abaixo:

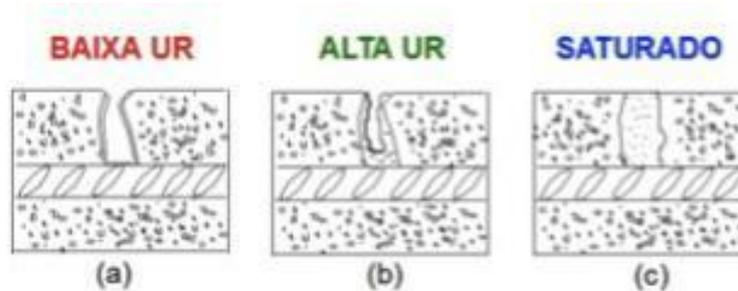


Fig. 23. Teor de umidade dos poros do concreto em função da umidade
Fonte: Andrade, 1992, p. 34

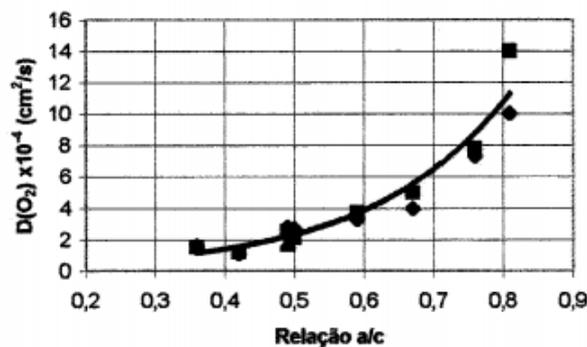


Fig. 24. Influência da relação água/cimento no coeficiente de difusão de oxigênio
Fonte: Tuuti, 1982

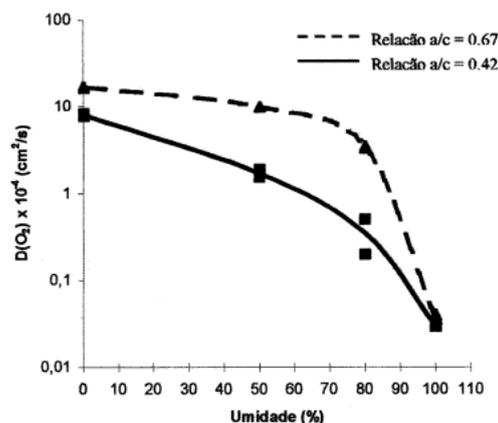


Fig. 25. Umidade x Difusividade de O₂.
Fonte: Tuuti, 1992

A razão para a influência do teor de umidade se deve ao fato de que a difusão de oxigênio na água é muito mais lenta que no ar, ou seja, os poros cheios de água atuam como barreira ao acesso de oxigênio até a armadura.

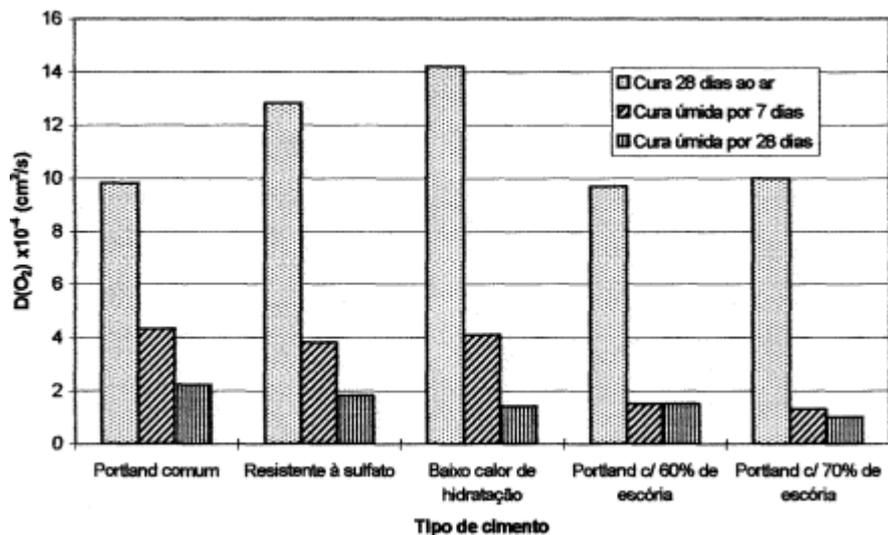


Fig. 26. Influência da cura e do tipo de cimento nos coeficientes de Difusão
Fonte: Kobayashi & Shutton (1991)

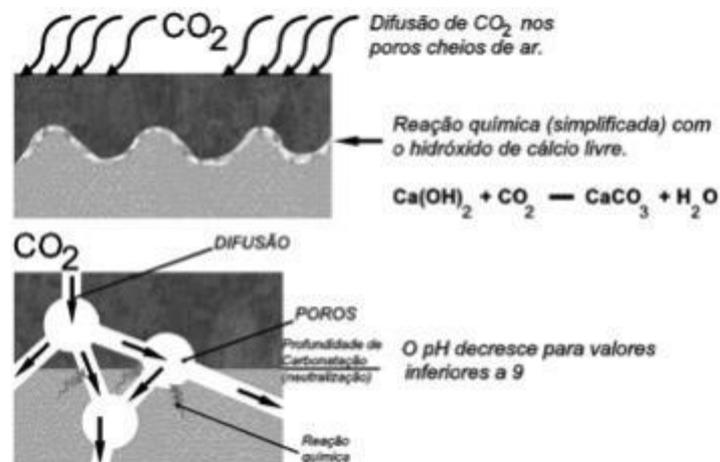


Fig. 27. Penetração de CO_2 por Difusão e Processo de Carbonatação
Fonte: E: Ribeiro; Cunha (2014)

2.3 BIBLIOGRAFIA

ANDRADE, C. **Calculation os diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements.** Cement and Concrete Research, v. 23, 1993.

ANDRADE, P.M.C., **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: Pini, 1992.

BRANDÃO, A. M. S.; PINHEIRO, L. M. (1999). **Qualidade e durabilidade das estruturas de concreto armado: aspectos relativos ao projeto.** *Cadernos de Engenharia de Estruturas*. n.8. EESC. Universidade de São Paulo.São Carlos.

CEB – Comitê Euro-Internacional do Beton – Bulletin D’informacion nº 183 – **Durable Concrete Structures** – 1992.

FERREIRA, R. M.. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.

FREIRE, K.R.R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto.** 192p. Dissertação (Mestrado em Estruturas), Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005.

GJORV, O. E., **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HELENE, P.; PACHECO, J.; **Controle da Resistência do Concreto.** *Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción – ALCONPAT Int.*, Mérida – México, 2013.

HOPPE, T. **Resistividade elétrica do concreto contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz.** Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

JANSSEN, H. **Thermal Diffusion of water vapour in porous materials: facto r friction?** International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011.

MARTYS, N.S.; FERRARIS, C.F. **Capillary transport in mortars and concrete.** *Cement and Concrete Research*, v. 27. 1997.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo: PINI, 1994.

MILLARD, S. G. **Reinforced concrete resistivity measurement techniques.** Proceedings of Institute of Civil Engineers. Vol. 91, parte 2, (1991).

PESSOA, R. C. J et al. **Porosidade do Concreto determinada por Microtomografia com Raios X e Processamento de Imagens**. Engenharia Estudos e Pesquisas ABPE, 2014.

RIBEIRO et al., **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos**. São Paulo, 1998. 163 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

SILVEIRA, R. G., **Estudo da microestrutura da camada de cobrimento de concretos com altos teores de cinza volante**. Santa Maria, 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria.

SOUZA, V.C.M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço das estruturas de concreto**. São Paulo: PINI, 1998.

TUUTI, K. **Corrosion of Steel in concrete**. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

3. Fonte: LIVRO DO KINDLE DURABILITY OF CONCRETE: DESIGN AND CONSTRUCTION. Autores: Mark Alexandre et al.

CAPÍTULO 4 – DETERIORAÇÃO DO CONCRETO

3.1 PROPRIEDADES DO CONCRETO APLICÁVEIS À DETERIORAÇÃO

A deterioração do concreto é em grande parte devido à entrada de agentes agressivos do ambiente na matriz. Outra deterioração pode surgir internamente, por exemplo, reação álcali-agregado (AAR) ou atraso na formação de etringita. **Mesmo as causas internas de deterioração exigem o movimento de íons ou líquidos, de modo que a deterioração está intimamente relacionada às propriedades de transporte do concreto**, que também incluem transferência elétrica, pois a corrosão do aço exige movimento interno de íons para transportar corrente elétrica.

3.1.1 PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DO CONCRETO

Mecanismos de deterioração, como ataque químico, lixiviação, entrada de cloro ou carbonatação estão relacionados à facilidade com que fluidos ou íons podem se mover através da microestrutura do concreto. O termo usado para descrever isso é a PENETRABILIDADE ou PERMEABILIDADE, que é o grau em que o concreto permite que gases, líquidos ou espécies iônicas se movam através de sua estrutura de poros; inclui permeação, adsorção, difusão e migração. Uma representação dos vários processos de penetrabilidade em uma estrutura típica de paredes oceânicas (excluindo a migração) é dada na Figura 28 (após BS 6349-1), enquanto a Figura 29 mostra as interações desses processos (Claisse, 2005).

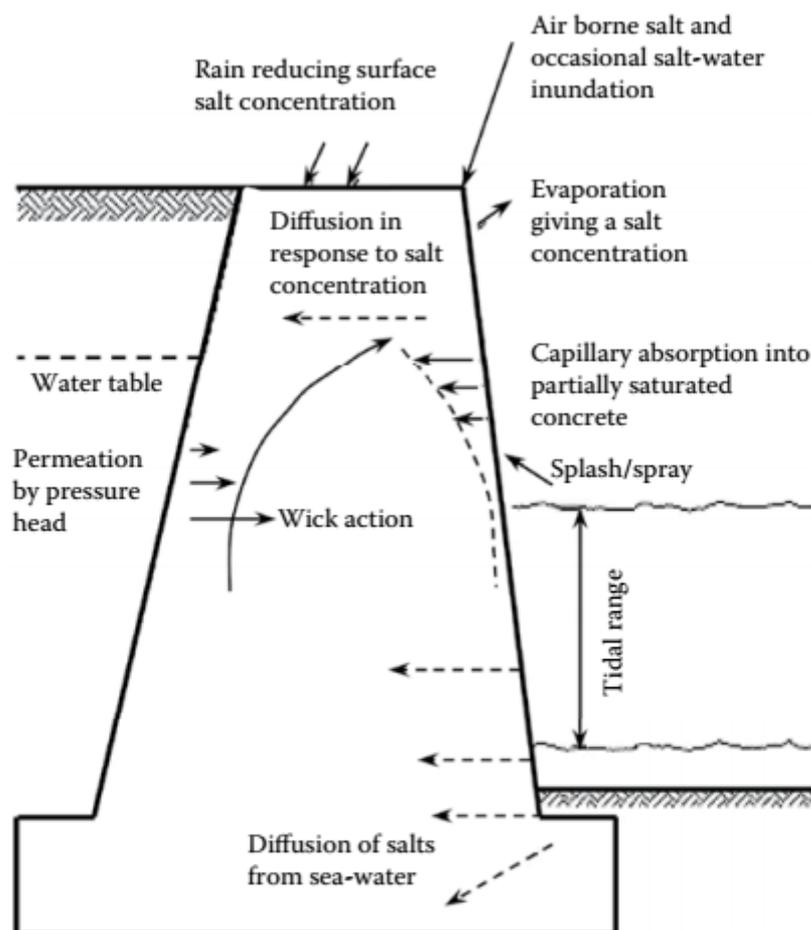


Figure 4.3 Penetrability processes illustrated by way of a sea wall. (After BS 6349-1-4:2013, 2013, Maritime works. General. Code of practice for materials, The British Standards Institution, London, UK.)

Fig. 28. Penetrabilidade ou Permeabilidade

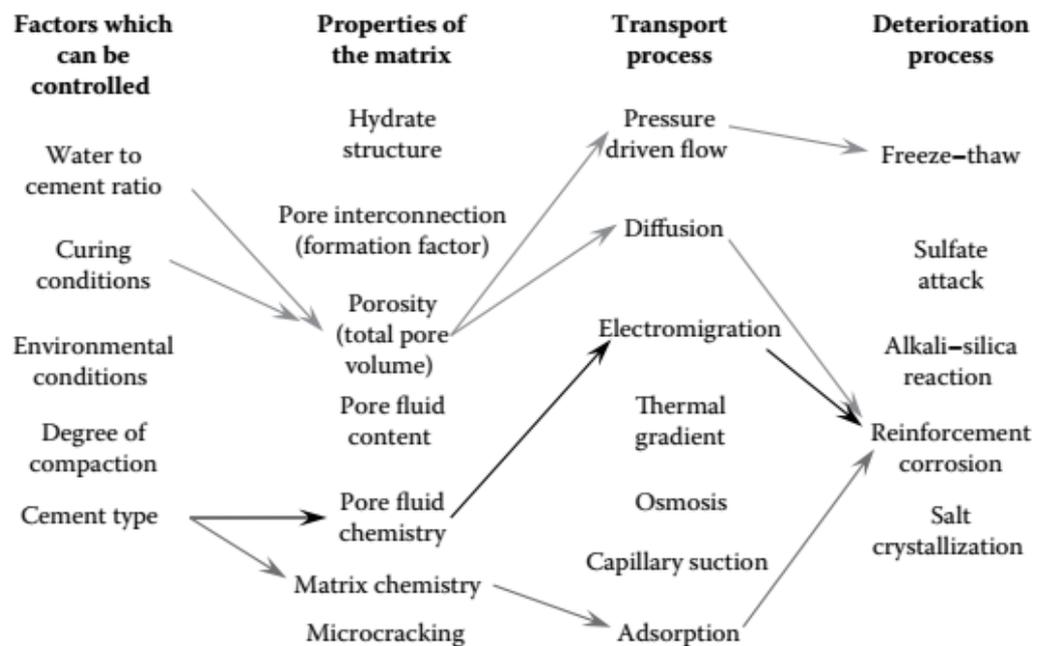


Figure 4.4 Concrete and environment: factors influencing “penetrability” of concrete. (After Claisse, P. A. 2005. Transport properties of concrete, *Concrete International*, 27(1), 43–48, reproduced with permission from the American Concrete Institute.)

Fig. 29. Fatores que influenciam a Penetrabilidade ou Permeabilidade

3.1.1.2 PERMEABILIDADE

A PERMEAÇÃO É O MOVIMENTO DE FLUIDOS ATRAVÉS DA ESTRUTURA DO PORO SOB UM GRADIENTE DE PRESSÃO, COM OS POROS SATURADOS COM O FLUIDO PARTICULAR. É expresso como um coeficiente de permeabilidade, que quantifica a capacidade de transferência de fluidos do concreto por permeação. A permeabilidade do concreto depende de sua microestrutura, sua condição de umidade e as características do fluido permeável. Em relação à deterioração, **A PERMEAÇÃO É MAIS PREJUDICIAL QUANDO O FLUIDO PERMEÁVEL É AGRESSIVO**, por exemplo, a água mole permeando através de um revestimento de túnel e lixiviando os componentes solúveis do concreto, enfraquecendo-o.

31.1.3 ABSORÇÃO

A ABSORÇÃO OCORRE QUANDO UM FLUIDO É ABSORVIDO POR UM MATERIAL INSATURADO POROSO DEVIDO À SUCÇÃO CAPILAR E DEPENDE DA GEOMETRIA DO PORO E DO GRAU DE SATURAÇÃO. Geralmente é **PREOCUPANTE EM CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAGEM** na superfície do concreto, o que pode resultar em amolecimento, rachaduras e acúmulo de sais. **A ABSORÇÃO É FORTEMENTE INFLUENCIADA PELO TAMANHO E INTERCONECTIVIDADE DOS CAPILARES MAIORES E É SENSÍVEL À CURA, PARTICULARMENTE DA SUPERFÍCIE DO CONCRETO.**

3.1.1.4 DIFUSÃO

DIFUSÃO É O PROCESSO PELO QUAL LÍQUIDOS, GASES OU ÍONS SÃO TRANSPORTADOS ATRAVÉS DE UM MATERIAL POROSO POR UM GRADIENTE DE CONCENTRAÇÃO. **A difusão ocorre em concreto parcialmente ou totalmente saturado e é um importante mecanismo de transporte para muitas estruturas de concreto expostas a sais, que se difundem para dentro devido a uma alta concentração superficial. A propriedade do material para difusão é a difusibilidade, medida tipicamente por um coeficiente de difusão.** A difusão é descrita pela primeira e segunda leis de difusão de Fick. No concreto, a difusão é complicada por vários fatores: interações químicas com os produtos de hidratação, condições parcialmente saturadas e defeitos como rachaduras e vazios, os quais tornam as suposições por trás das leis de Fick praticamente inválidas. No entanto, essas leis ainda são usadas recorrendo a coeficientes de difusão “aparentes” ou “efetivos” para análise e predição. Em estruturas marítimas ou estruturas expostas a sais de degelo, a difusão de cloretos pode causar a despassivação do aço de reforço, levando à corrosão destrutiva. (Veja mais adiante neste capítulo a corrosão do aço.) **O transporte de oxigênio no concreto para a superfície do aço - necessário para a corrosão ativa - também é governado principalmente pela difusão.**

3.1.1.5 MIGRAÇÃO

Migração (ou difusão acelerada, eletrodifusão ou condução) é o movimento de íons em uma solução sob um campo elétrico, normalmente

usado em testes acelerados de cloreto. É descrito pela equação de Nernst-Planck. Detalhes podem ser encontrados em Andrade (1993) e no Capítulo 6.

3.1.1.6 PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DO CONCRETO FISSURADO

A presença de fissuras modifica substancialmente as propriedades de transporte do concreto e, portanto, também os mecanismos e taxas de deterioração. Microtrincas discretas e bem distribuídas influenciarão o transporte de maneira muito diferente em comparação com as macrotrincas visíveis, conectadas e localizadas. O transporte em concreto rachado é um fenômeno acoplado entre a matriz e a fissura. Os parâmetros para descrever o fluxo em material rachado versus material intacto são diferentes; propriedades de fissuras dominam o concreto rachado, enquanto a permeabilidade e a porosidade governam o material sólido.

Teorias e processos que se sustentam em concreto sadio não podem, portanto, simplesmente ser transferidos para concreto rachado. As rachaduras em si são o elemento mais importante, representado pela largura e forma da fissura, densidade / frequência da fissura, grau de conectividade da fissura e origem da fissura. (Mais informações são fornecidas na Seção 4.2.3.)

3.1.1.7 SUMÁRIO DOS PROCESSOS DE TRANSPORTE

OS PROCESSOS DE TRANSPORTE RARAMENTE ATUAM ISOLADAMENTE, EMBORA FREQUENTEMENTE UM OU OUTRO PROCESSO DOMINE. Ao considerar a deterioração do concreto, os processos de transporte dominante e secundário devem ser identificados para um diagnóstico adequado. Isso também é crítico para o design de durabilidade, em que os modelos ou procedimentos são selecionados com base nos processos de transporte em jogo.

3.2.1 PROPRIEDADES MECÂNICA, FÍSICA E QUÍMICA COM RELAÇÃO À DETERIORAÇÃO

A deterioração envolve interações entre o material e o meio ambiente, com propriedades de transporte, bem como propriedades mecânicas, físicas e químicas básicas do concreto, desempenhando papéis cruciais.

3.2.1.1 PROPRIEDADE MECÂNICA E FÍSICAS

Engenheiros estruturais geralmente entendem as propriedades mecânicas (e, em menor grau, físicas) do concreto, já que elas são usadas no projeto e na especificação. Uma compreensão dessas propriedades também é essencial para entender a deterioração concreta. As principais propriedades mecânicas e físicas do concreto são a resistência à compressão e à tração (e resistência ao cisalhamento relacionada), rigidez (módulo de elasticidade), fluência e retração, coeficiente de expansão térmica e densidade. Destes, força e rigidez predominam no design estrutural. Força tem sido usada tradicionalmente como um caminho para durabilidade e resistência à deterioração. No entanto, com a evolução da tecnologia e prática concretas, esta abordagem é agora totalmente inadequada e excessivamente simplista. Os ligantes modernos são altamente variáveis, novas tecnologias, como o concreto auto-compactável, estão se tornando comuns e as misturas permitem que as proporções de mistura sejam ajustadas dentro de amplas faixas, tornando assim obsoleta a “**equivalência força-durabilidade**” do passado. Isso é ilustrado na Figura 4.5 com dados de um estudo baseado em locais em que as estruturas de concreto armado foram avaliadas quanto à resistência com base em testes padrão de cubo e permeabilidade in situ usando um teste de índice de permeabilidade ao oxigênio (OPI). **Permeabilidade e força essencialmente não mostram relação**, e a força claramente não pode ser usada como um caminho para “durabilidade” neste caso.

Situações semelhantes surgem para outras propriedades, tais como a difusibilidade, particularmente com aglutinantes misturados modernos, onde a química do aglutinante é igual, se não mais importante do que, a relação w / b ou força.

A rigidez é uma propriedade mecânica nem sempre apreciada pelo profundo efeito que pode ter na deterioração, mais particularmente na fissuração. Em situações em que o concreto é retido contra o movimento, levando a contrações induzidas e / ou deformações térmicas, são estabelecidas tensões de tração que podem rachar o concreto. Para qualquer restrição, a tensão de tração correspondente é diretamente proporcional ao módulo de elasticidade do concreto. Assim, os concretos de alto módulo são mais sensíveis à trinca e, portanto, mais sensíveis à durabilidade. Estes efeitos podem ser frequentemente observados em lajes em pavimentos de concreto ou em secções de paredes fundidas em bases pesadas, em mudanças na forma da secção tais

como aberturas e semelhantes. Ilustrações fotográficas típicas são mostradas na Figura 30.

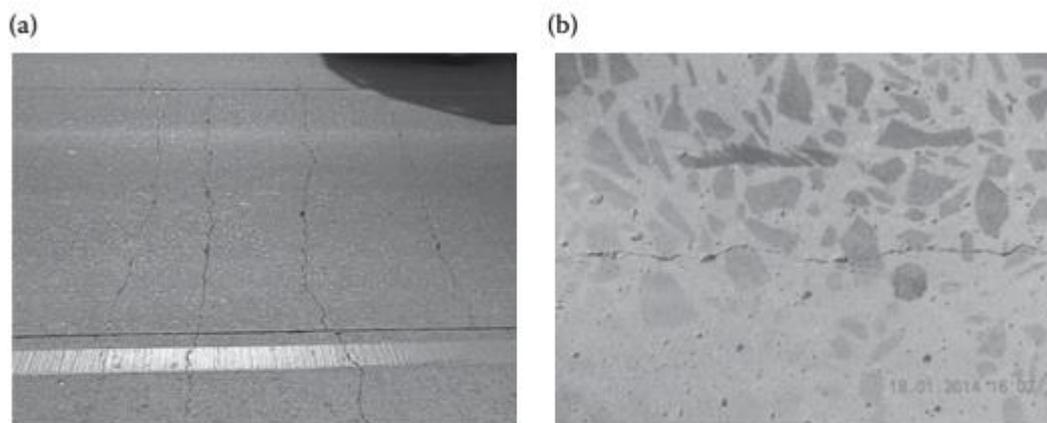


Figure 4.6 Photos of concrete cracking due to restrained shrinkage or thermal movement. (a) Cracking of concrete slab-on-grade . (Courtesy of Dr P. Strauss); (b) thermal cracking of concrete wall (sawn section).

Fig. 30. Fotos de Fissurações

3.2.1.2 PROPRIEDADES QUÍMICAS

Os produtos químicos da hidratação são estáveis em muitos ambientes, mas podem ser atacados, por exemplo, por sulfatos ou água mole. Além disso, os hidratos freqüentemente interagem com agentes penetrantes como na carbonatação ou entrada de cloreto, formando novos compostos que podem ou não ser prejudiciais ao concreto. Os principais produtos de hidratação quando o cimento Portland reage com a água em temperaturas normais são os seguintes (composições aproximadas):

Silicate phases	$3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ —calcium silicate hydrates [CSHs]
Aluminate phases	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ —ettringite or AFt, formed by reaction of tricalcium aluminate (C_3A) with gypsum and water
	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ —monosulfate or AFm, formed by transformation of ettringite when sulfate is exhausted

Os produtos de reação de silicato são fracamente cristalinos e coloidais, com um subproduto de hidróxido de cálcio cristalino em quantidades bastante abundantes. Os hidratos de silicato são estáveis em ambientes de alto pH, como no concreto. No entanto, a percolação de águas ou a lixiviação superficial pode

remover fases mais solúveis, como hidróxido de cálcio e hidróxidos metálicos de sódio e potássio, desestabilizando a CSH e levando à quebra progressiva da matriz, à medida que o hidróxido de cálcio adicional é liberado para restabelecer o equilíbrio. As fases de aluminato são termodinamicamente menos estáveis que as fases de silicato, e suas reações podem se mover em qualquer direção, dependendo da concentração de sulfatos solúveis presentes. Isso pode ocorrer internamente na matriz, ou por ingresso externo de soluções de sulfato, o que favorece a formação de etringita expansiva. As reações de hidratação são exotérmicas, gerando ganho de calor e aumento de temperatura no concreto hidratante em idades precoces. Se a temperatura subir para níveis excessivamente altos (tipicamente > 70-80 ° C), a formação de etringita pode ser suprimida, mas pode então se formar em um estágio posterior, causando expansão destrutiva (chamada formação tardia de etringita [DEF]). Para garantir a longevidade das estruturas de concreto, sua estabilidade química inerente, juntamente com sua robustez física, é crítica. Os materiais cimentícios suplementares (SCMs), que aumentam a quantidade de hidratos e geralmente melhoram a microestrutura do concreto, também contribuem muito para melhorar a resistência do concreto à deterioração. Em ambientes agressivos, os cimentos misturados são quase sempre preferidos, com a importante ressalva de que os concretos de cimento misturados geralmente são mais sensíveis à baixa cura e às baixas temperaturas, e precauções adequadas devem ser tomadas para resolver esses problemas durante a construção.

3.2.2 FISSURAS NOS CONCRETOS E SUA INFLUÊNCIA NA DETERIOÇÃO

O fissuramento é onipresente no concreto, e quase todas as estruturas de concreto exibem rachaduras de algum tipo, tornando o craqueamento um mecanismo de deterioração por si só. O fissuramento pode ocorrer a partir da microescala, onde existem diferenças entre os coeficientes térmicos e higrotérmicos dos constituintes do concreto (por exemplo, dentro da pasta de cimento hidratada [hcp] ou entre o hcp e os agregados) para a macroescala, como rachaduras grandes com vários milímetros de largura carga excessiva, craqueamento por retração de secagem ou AAR. O macrocracking terá diferentes efeitos nas propriedades do concreto e nos mecanismos de deterioração. O fissuramento pode ser dividido amplamente em rachaduras estruturais e não estruturais (ou não induzidas por carga). O craqueamento estrutural é muitas vezes a intenção do projeto, como os feixes rachados que funcionam mobilizando as propriedades de tração do aço de reforço. Fórmulas de projeto podem ajudar a estimar e controlar a extensão do craqueamento

estrutural, e esse craqueamento não será mais considerado aqui. Basta dizer que o craqueamento estrutural tem uma influência profunda na deterioração do concreto, como sua influência nas taxas de corrosão de elementos de concreto armado em ambientes agressivos, onde a corrosão ativa pode começar imediatamente a entrar em operação, reduzindo potencialmente a vida útil.

O fissuramento não estrutural geralmente envolve interação do concreto e seu ambiente, e pode afetar seriamente a durabilidade do concreto ao permitir a entrada de agentes agressivos no corpo do material. Geralmente está relacionada a mudanças de volume restritas nos materiais constituintes. Em geral, o concreto deformado não quebra ou, pelo menos, não mostra o macrocraqueamento. A restrição se aplica em diferentes níveis de escala: em uma microescala, o hcp sofre movimentos de temperatura e umidade que são restringidos pelos agregados rígidos que causam microtrincamento interno; em uma macroescala, as placas em grau são contidas pela sub-base e podem rachar na ausência de juntas projetadas e executadas adequadamente (Figura 30). Assim, prevenir ou minimizar rachaduras envolve reduzir a restrição no concreto. No restante desta seção, os mecanismos de quebra e as causas relacionadas aos vários tipos de trincas, principalmente não estruturais, são revisados com ênfase na deterioração do concreto. A Figura 31 resume os principais tipos de craqueamento não estrutural juntamente com as causas e comentários informativos, enquanto a Figura 32 ilustra algumas dessas rachaduras.

		Causes	Likelihood of micro-vs. macro cracking	Comments*	
Types and causes of cracks	After hardening	Physical	Shrinking aggregates	— Macro	#1
			Drying shrinkage	— Macro	#2
			Fire; thermal crazing	— Macro and micro	#3, #4
		Physico químico	Early-age autogenous shrinkage	— Micro	#5
			Chemical	Corrosion of reinforcement	— Macro
		Alkali-aggregate reaction		— Macro and micro	#7
		Sulfate attack		— Macro and micro	#8
		Thermal	Carbonation	— Micro	#9
			Freeze/thaw cycles	— Macro and micro	#10
			External seasonal temperature variations	— Macro	#11
	Early thermal contraction		External restraint	— Macro	#12
			Internal temperature gradients	— Macro	#12
	Structural	Accidental overload	— Macro	#13	
		Creep			
		Design loads			
Before hardening	Plastic	Plastic shrinkage	— Macro	#14	
		Plastic settlement			
	Constructional movement	Formwork movement	— Macro	#15	
Subgrade movement					

- * -
- #1 Shrinking aggregates can cause excessive cracking and deflections in structures. Eliminate by standard dimensional stability testing.
- #2 Drying shrinkage caused by moisture loss from the concrete. Most likely in thin elements that dry rapidly.
- #3 Concrete subjected to fire loses moisture in the outer layer and also suffers de-hydration and destructive reactions, giving both macro and micro-cracking.
- #4 Crazing is evident on "fair-face" concrete with impermeable formwork, or where slabs are over-trowelled bringing fines to the surface; fine "map cracking".
- #5 Autogenous (internal) shrinkage results from both "chemical shrinkage" and self-desiccation shrinkage, particularly in rich mixtures with low w/b ratios (<0.4 typically). It can cause extensive internal damage.
- #6 See other section in this chapter for cracking and reinforcement corrosion.
- #7 AAR cracking, normally seen as coarse "map cracking", is both macro and micro scale, resulting from expansive reactions between usually cement alkalis and susceptible forms of reactive aggregate minerals, typically reactive silica. It is highly detrimental to aesthetics and also to structural integrity depending on the nature and form of the structure.
- #8 Sulphate attack arises from volume expansion of the cementitious products, and is generally highly damaging to concrete.
- #9 Carbonation results in shrinkage of the matrix by release of water that then evaporates. A secondary form of shrinkage.
- #10 Freeze-thaw damage produces internal microcracks that also manifest as macrocracks on the surface. This cause also includes aggregate D-cracking in which aggregates crack from internal hydraulic pressure on freezing.
- #11 Temperature variations can cause surface cracking which, though visible, may not penetrate very deeply.
- #12 Early thermal contraction arises from concrete temperature rise due to heat of hydration, and is often exacerbated by subsequent drying shrinkage. Occurs typically in restrained elements such as walls cast on stable bases.
- #13 Structural-induced cracking is of many types, often by design (e.g. in flexural members). Where it is non-intentional, it is usually detrimental to durability.
- #14 Plastic shrinkage cracking arises mainly in flat work where the rate of evaporation from the surface exceeds the rate of belling, normally associated with high temperatures and drying winds; plastic settlement cracking is caused by settlement of the fresh concrete over reinforcement, or at changes of depth in e.g. troughs and waffle slabs.
- #15 Formwork or subgrade movement while the concrete is still plastic can also cause macrocracking.

Figure 4.7 Types and causes of cracks in concrete. (Adapted from Concrete Society TR22, 2010, *Non-Structural Cracks in Concrete*, 4th edition, Concrete Society, Surrey, UK.)

Fig.31. Tipos e Causas de Fssuras em Concretos

A figura 31 mostra que o craqueamento pode ocorrer tanto no estado plástico quanto no estado endurecido. O craqueamento em estado plástico tende a ser do tipo macro, com graves conseqüências para a integridade estrutural e a durabilidade. Algumas fissuras de plástico podem ser remediadas durante a construção por meio da re-vibração do concreto, desde que ele ainda seja suficientemente plástico. No entanto, o craqueamento no estado endurecido resulta em danos permanentes ao concreto, com conseqüências concomitantes. A Figura 31 também sugere a probabilidade de qual tipo de craqueamento será micro versus macroescala. A distinção entre essas duas escalas de rachaduras é um tanto arbitrária e, de fato, alguns pesquisadores inserem uma outra escala - a mesoescala. Aqui, o microtrincamento é tomado a partir da ordem do tamanho do grão de cimento, isto é, até cerca de 30 microns, em geral não visível a olho nu. O macrocracking é considerado da ordem de 100 microns até vários milímetros, e geralmente será visível. Mesoscale cai entre as outras duas categorias. O microfissuramento comprometerá as propriedades de transporte do concreto aumentando sua permeabilidade e penetrabilidade. No entanto, isso dependerá da largura da microtrincada, e o concreto pode continuar a agir em grande parte como um “continuum”. A Figura 32 ilustra o efeito do microfissuramento na permeabilidade da água através de amostras de laboratório de concreto. Acima de uma largura de fenda de cerca de 100 microns, os efeitos aumentam.

66 Durability of Concrete

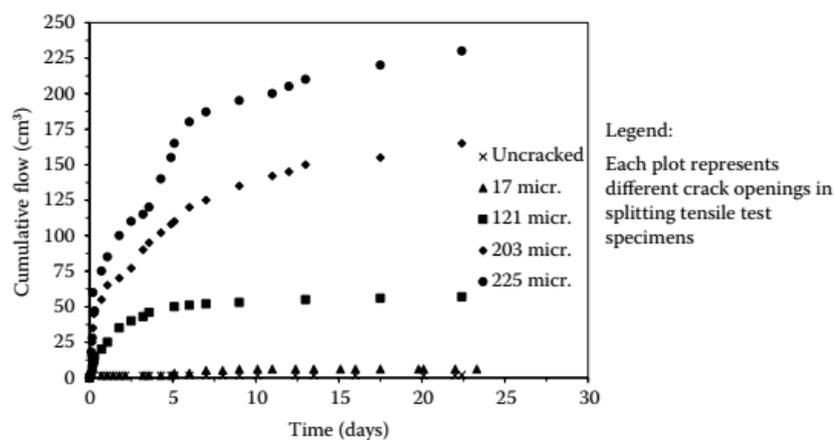
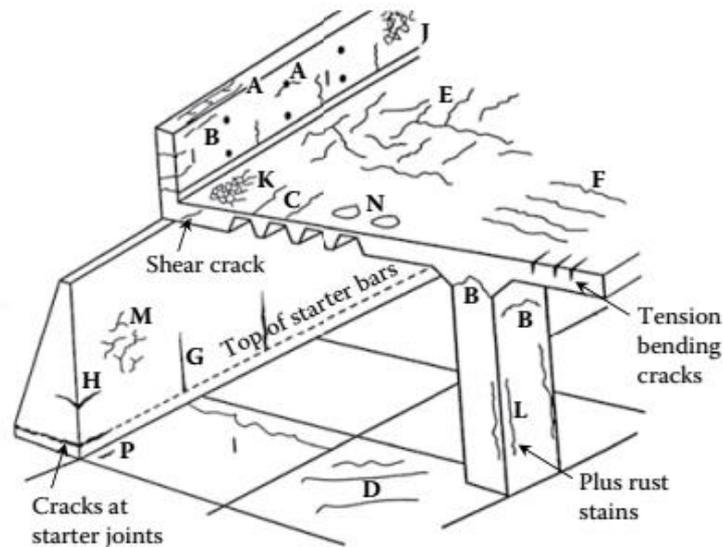


Figure 4.9 Influence of microcracking on normal strength concrete permeability (measured as cumulative flow). (With kind permission from Springer Science+Business Media: Materials & Structures, Permeability of cracked concrete, 32, 1999, 370–376, Aldea, C. M., Shah, S. P., and Karr, A.)

Fig. 32 Efeito do fissuramento na Permeabilidade

A Figura 33 ilustra diversas fissuras não estruturais nos concretos.



Legend:

Type of cracking	References	Subdivision	Most common locations	Primary causes (excluding restraint)	Secondary causes	Remedy	Time of appearance
Plastic settlement	A	Over reinforcement	Deep sections	Excess bleeding	Rapid early drying conditions	Reduce bleeding (air entrainment) or revibrate	10 minutes to 3 hours
	B	Arching	Top of columns				
	C	Change of depth	Trough and waffle slabs				
Plastic shrinkage	D	Diagonal	Roads and slabs	Rapid early drying	Low rate of bleeding	Improve early curing	30 minutes to 6 hours
	E	Random	Reinforced concrete slabs	Ditto + steel bar near surface			
	F	Over reinforcement	Reinforced concrete slabs				
Early thermal contraction	G	External restraint	Thick walls	Excess heat generation	Rapid cooling	Reduce heat and/or insulate	1 day to 3 weeks
	H	Internal restraint	Thick slabs	Excess temp. gradients			
Long-term drying shrinkage	I	-	Thin slabs/walls	Inefficient joints	Excess shrinkage, inefficient curing	Reduce water content, improve curing	Several weeks or months
Crazing	J	Against formwork	"Fair-faced" concrete	Impermeable formwork	Rich mixes, poor curing	Improve curing and finishing	1-7 days, sometimes much later
	K	Floated concrete	Slabs	Over trowelling			
Corrosion of reinforcement	L	Natural	Columns and beams	Insufficient cover	Poor quality concrete	Eliminate causes listed	More than 2 years
Alkali-silica reaction	M	-	(Damp locations)	Reactive aggregates + high alkali content		Eliminate causes listed	More than 5 years

Figure 4.8 Illustration of non-structural cracks in concrete. (Adapted from Concrete Society TR22, 2010, *Non-Structural Cracks in Concrete*, 4th edition, Concrete Society, Surrey, UK.)

Fig. 33. Fissuras não estruturais nos concretos.

Macrofissuramentos por contraste representa grandes discontinuidades no material, com ordens de aumento de magnitude na penetração, muitas vezes levando a uma redução substancial na vida útil de uma estrutura. Na Figura 34, a macrocrack de AAR permitirá a entrada rápida de agentes ambientais agressivos no aço, levando possivelmente a uma deterioração adicional por meio da corrosão do aço e ainda mais rachaduras induzidas por corrosão. A Figura 35, mostra os efeitos do concreto rachado versus não rachado nas taxas de corrosão do aço em pequenas vigas de concreto, onde é evidente que mesmo macrocidades relativamente “pequenas” podem ter efeitos substanciais sobre esse fenômeno. Embora a fissura possa ser considerada um mecanismo de deterioração por si só, geralmente interage com outros mecanismos de deterioração, causando um aumento na taxa de deterioração ou aparecendo como consequência. Assim, o craqueamento pode causar a corrosão do aço, mas esta corrosão pode provocar fissuras adicionais, o que agrava ainda mais a corrosão, e assim por diante. O craqueamento e sua influência na deterioração do concreto é um assunto complexo que merece tratamento mais completo do que o que pode ser dado aqui. (Informações adicionais podem ser obtidas nas referências dadas em “Further Reading”).



Figure 4.10 AAR-induced cracking representing a macrocrack, which may allow further deterioration to occur (core diameter 100 mm).

Fig. 34 Reação Álcali-Agregado

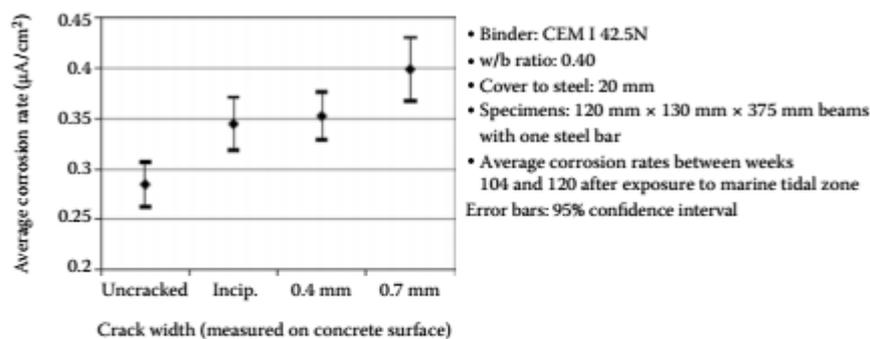


Figure 4.11 Corrosion rate of laboratory beams as a function of surface crack width. Note: “Incipient” crack invisible to the naked eye, obtained by loading to the point of nonlinearity of the load–deflection curve. (Courtesy of Otieno, M., 2014, *The development of empirical chloride-induced corrosion rate prediction models for cracked and uncracked steel reinforced concrete structures in the marine tidal zone*, PhD dissertation, University of Cape Town, Cape Town, South Africa.)

Fig. 35. Efeitos do fissuramento na corrosão

3.3 BIBLIOGRAFIA

ALEXANDER, M. et al. **DURABILITY OF CONCRETE: Design and Construction.** Modern Concrete Technology Series 20. Taylor & Francis, CRC Press, 2017.

4 FONTE: HIGROSPICIDADE e CAPILARIDADE NOS MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO – ANTAC

Os materiais usualmente empregados nas edificações, apresentam uma estrutura porosa, sendo capazes de fixar e transferir a umidade tanto na fase líquida quanto na fase gasosa. **QUANDO NA FASE LÍQUIDA, A UMIDADE É FIXADA E TRANSFERIDA NA ESTRUTURA POROSA ATRAVÉS DE PROCESSOS DITOS DE CAPILARIDADE.** É desta forma que a umidade do solo e das chuvas se introduz nos paramentos porosos das edificações. **QUANDO NA GASOSA, A UMIDADE SE UTILIZA DOS PROCESSOS DE ADSORÇÃO FÍSICA E CONDENSAÇÃO CAPILAR PARA SE FIXAR NOS POROS SUPERFICIAIS DOS MATERIAIS, SENDO POSTERIORMENTE TRANSFERIDA PARA O INTERIOR DOS MESMOS ATRAVÉS DE PROCESSOS ENVOLVENDO A TRANSFERÊNCIA DE LÍQUIDO POR CAPILARIDADE E DE VAPOR POR DIFUSÃO.**

Sem procurar definições rigorosas, denomina-se **HIGROSPICIDADE** ao efeito do **aumento do conteúdo de líquido dos materiais quando os mesmos são colocados em contato com o vapor d'água.** Por outro lado, a **CAPILARIDADE** caracterizaria esse mesmo efeito, quando os **materiais são colocados em contato com a água na fase líquida.**

A Figura 36 ilustra os mecanismos físicos possíveis de ocorrer na estrutura porosa de um material quando o mesmo é submetido a um gradiente da pressão de vapor entre as suas superfícies externas. A existência de **POROS CONDENSÁVEIS**, com diâmetros inferiores a 2000 angstroms (regiões A e B da Figura-1) **PROPICIA A FORMAÇÃO DE ILHAS DE LÍQUIDO**, constituídas por **POROS CONDENSÁVEIS CONECTADOS ENTRE SI** (eventualmente, formando um sistema contínuo ligando as duas superfícies externas do material) e preenchidas por líquido, resultante da condensação do vapor. Essas ilhas não são inertes, *não constituindo barreiras*

Para a passagem do vapor: pelo contrário, as mesmas intensificam, significativamente, o processo de transferência, uma vez que a sua resistência hidráulica é muito pequena, em relação à resistência hidráulica que a mesma teria caso estivesse preenchida com o vapor.

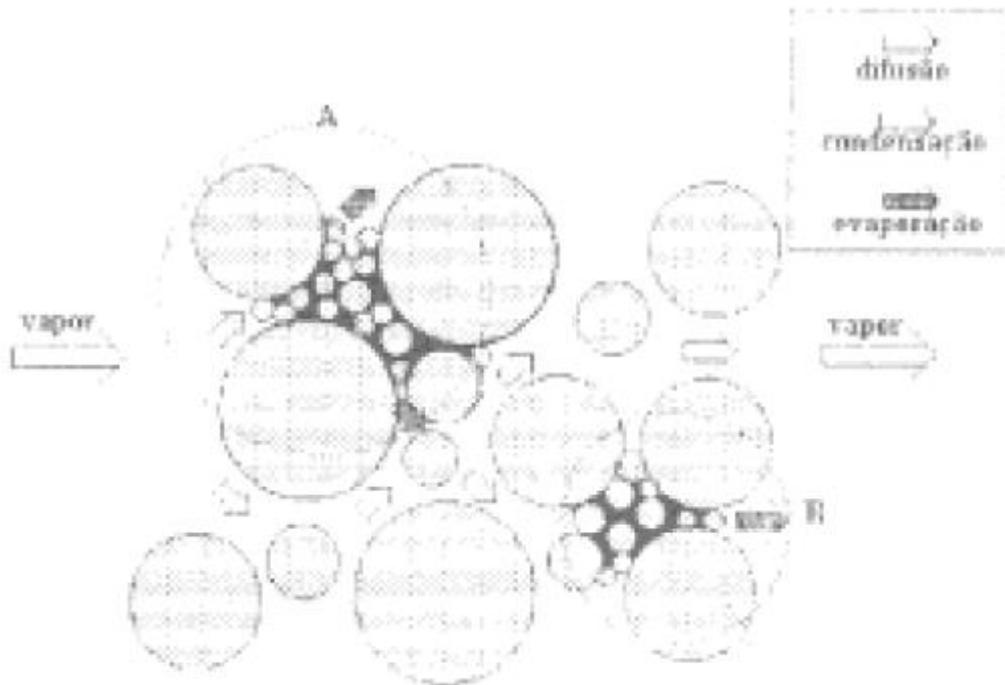


Figura 1 Transferência de vapor através de um material poroso quando as duas superfícies externas estão em contato com duas atmosferas a diferentes umidades relativas.

Fig. 36. Mecanismo de transferência de vapor nos poros

Materiais de construção são usualmente caracterizados por possuírem uma gama bastante extensa de diâmetros de poros que variam entre algumas dezenas de ângstroms a vários microns. Este é o caso dos materiais a base de aglomerantes hidráulicos (argamassas e concretos), assim como também é o caso para os materiais cerâmicos: tijolos telhas de barro. A presença de **POROS CONDENSÁVEIS, de pequenos diâmetros, em grande proporção:**

- i) Caracteriza as propriedades, de **HIGROSPICIDADE** desses materiais;
- ii) Modifica, significativamente, as suas características de **PERMEABILIDADE AO VAPOR**, que passa a depender do conteúdo de umidade presente em seus poros.

A figura-37 apresenta as isotermas de equilíbrio de uma argamassa de cal e (partes de areia fina, 2 partes de cal e 1 parte de cimento, em massa), usada como argamassa de revestimento (reboco) e edificações, obtidas a 50°C. A porosidade medida para a argamassa foi de 0,304. Algumas conclusões podem

ser obtidas dessa figura. **Quando submetida a valores crescentes de umidade relativa, a argamassa fixa umidade, por adsorção do vapor d'água podendo reter água líquida, a 96%UR, até cerca de 12% do seu volume poroso. Equivalente à 21,6 cm³ por cada Kg de argamassa (valores de equilíbrio a 30°C).**

- Em dessorção, o conteúdo retido de líquido é sempre superior ao equivalente em adsorção. Deste modo, caso a argamassa tenha, previamente sofrido uma processo de umidificação por contato com a água na fase líquida (por, e.g. exposição chuvas) a mesma conseguirá reter. A 96%UR, cerca de 37% do seu volume poroso líquido (equivalente a 66,4 cm³ por cada Kg de argamassa ou 3X o que a mesma retém em adsorção). **ISTO É: É MAIS DIFÍCIL SECAR A ARGAMASSA DO QUE UMIDIFICÁ-LA.**

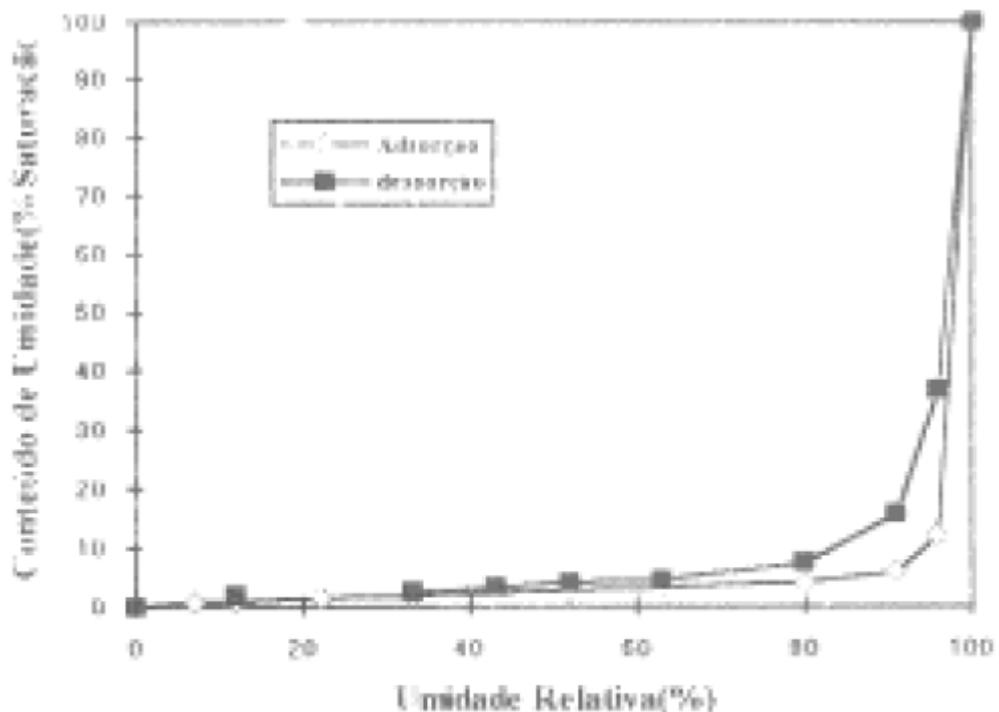


Figura 3 Isotermas de equilíbrio de uma argamassa de cal e cimento a 30°C

Fig. 37. Umidade relativa do ar x Umidade da Argamassa

Bueno et al. Fig. 38, discutem algumas consequências práticas associadas a influência da umidade sobre o comportamento térmico dos paramentos das edificações,

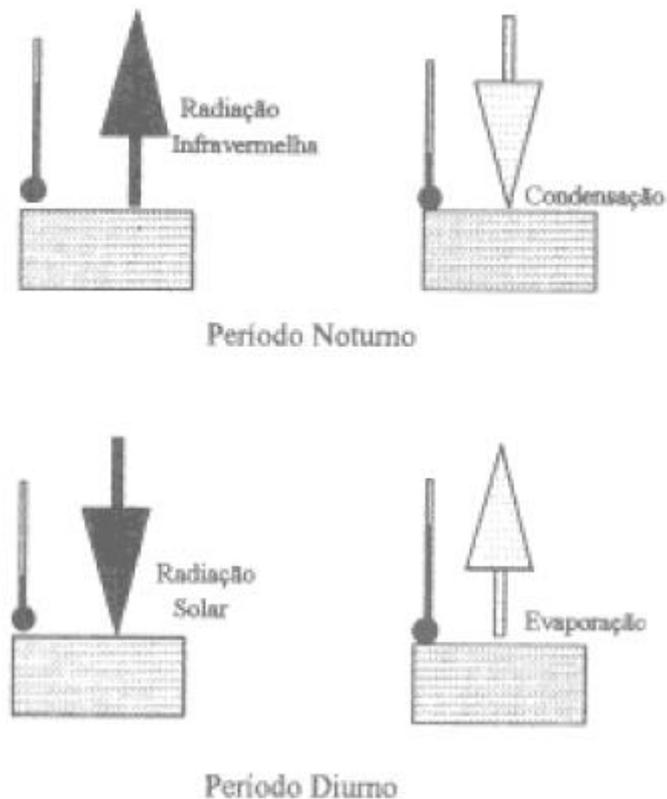


Fig. 38. Fixação/Evaporação e Umidade de poros

4.1 Efeito da Permeabilidade Relativa.

A observação cotidiana mostra que alguns **materiais porosos (como a ardósia), orvalham quando submetidos a um processo de esfriamento radiante, durante a noite**, enquanto que, **outros materiais (como a telha de barro), não orvalham, quando submetidos às mesmas condições** (Figura 39). *Quais as razões dessa diferença?*

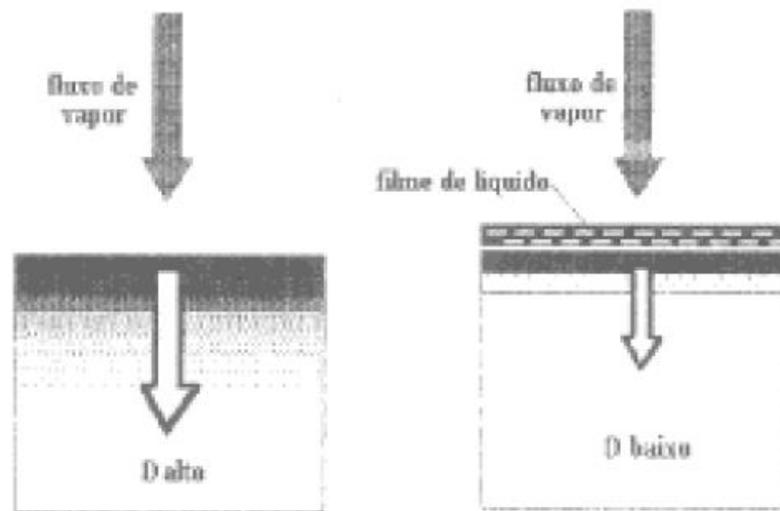


Fig. 39. Influência da Umidade Relativa

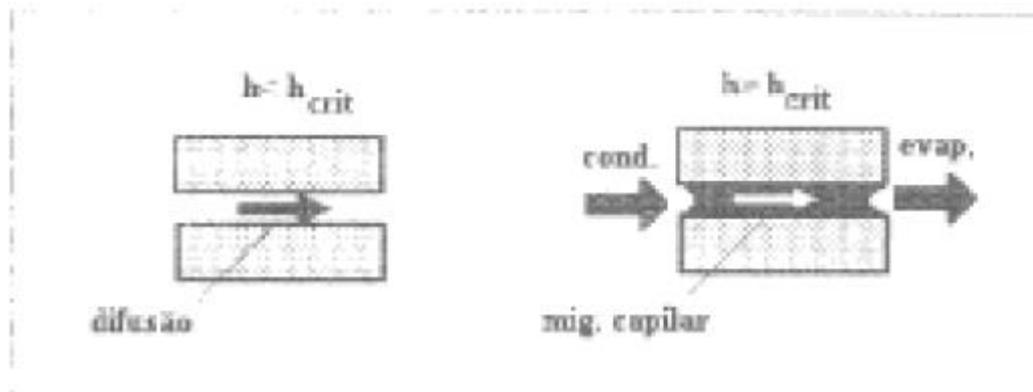
DESSE MODO, MATERIAIS COM UMA FRAÇÃO IMPORTANTE DE POROS FINOS (COMO A ARDÓSIA) ORVALHAM COM MAIS FACILIDADE, EM RELAÇÃO A UM MATERIAL COM UMA FRAÇÃO PREDOMINANTE DE POROS GROSSOS (COMO A TELHA DE BARRO). Todavia, ainda que pelos mesmos motivos, os primeiros são mais higroscópicos que os segundos, no sentido que fixam uma quantidade em massa de água líquida mais importante que os segundos quando *em equilíbrio* com atmosferas mantidas à mesma umidade relativa. Isto é: *ainda que mais ávidos por umidade, os materiais higroscópicos apresentam uma cinética de adsorção mais lenta.* A mesma Tabela 3, abaixo, indica essa diferença quando se compara as resistências hidráulicas de poros com diferentes diâmetros: quando se passa de poros de 200 Angstroms para poros de 1000 Angstroms a resistência hidráulica é reduzida por um fator de 10 (tanto em fase líquida quanto em fase vapor). Em suma, materiais com uma distribuição importante de poros finos:

- são mais higroscópicos;
- apresentam uma menor permeabilidade relativa, com uma cinética de, adsorção mais lenta;
- orvalham mais facilmente.

Tabela 3. Resistências Hidráulicas de Poros Cilíndricos com diferentes diâmetros



D(Angstrom)	d(Angstrom)	h_{crit}	$R_g(SI)$	$R_p(SI)$
100	100	0.8070695	$6.06E+12$	$2.09E+12$
200	200	0.8983704	$3.03E+12$	$2.91E+11$
500	500	0.9580368	$1.21E+12$	$1.99E+10$
1000	1000	0.9787935	$6.06E+11$	$2.54E+09$
2000	2000	0.9893399	$3.03E+11$	$3.20E+08$
10000	10000	0.9978588	$6.06E+10$	$2.59E+06$
100000	100000	0.9997857	$6.06E+09$	$2.59E+03$



Desse modo, é muito importante conhecer (eventualmente: *controlar*) a distribuição em volume dos poros dos materiais: isso permite inferir de maneira bastante precisa sobre as suas características de retenção e transporte de umidade.

4.2 BIBLIOGRAFIA

Philippi, C. P. et al. **Higroscopicidade e Capilaridade nos Materiais Porosos**. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído.