CORROSÃO DAS ARMADURAS

Mecanismos de Transporte de Massa em Estruturas de Concreto



Fábio Giovanni Xavier de Oliveira
Engenheiro Civil

Mecanismos de Transporte de Massa em Estruturas de Concreto

FÁBIO GIOVANNI
ENGENHARIA CONSULTIVA

A Patologia das construções é uma disciplina relativamente recente na engenharia civil. Com o passar dos anos, a maior incidência de manifestações patológicas, em virtude do envelhecimento das construções, deu a possibilidade aos engenheiros e pesquisadores de perceberem, que havia um carácter não aleatório nas causas e origens dos problemas ocorridos.

O presente e-book é parte integrante de uma série de escritos acerca dessa disciplina a patologia das construções. O enfoque será dado à corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado que é considerada um dos principais problemas de degradação do ambiente construído ao redor do mundo. O patamar de gastos envolvido com as atividades de recuperação das estruturas de concreto armado, acometidas por essa manifestação patológica, atinge as centenas de bilhões de dólares, nos países desenvolvidos ou em desenvolvimento.

Sumário

INTRODUÇÃO.....5
DIFUSÃO.....8
MIGRAÇÃO IÔNICA.....11
CONVECÇÃO.....13
ABSORÇÃO CAPILAR.....15
PERMEABILIDADE.....17
REFERÊNCIAS.....9

INTRODUÇÃO

ANDRADE et alli (1995), comentam que movimento dos íons através da solução eletrolítica do concreto segue a lei de transporte de massa de Nernst-Plank, que determina esse fluxo através da equação abaixo:

$$J(x) = -D_j \frac{\partial C_j(x)}{\partial x} + \frac{Z_j F}{RT} D_j C_j + C_j V(x)$$

Fluxo Total = Difusão + Migração Iônica + Convecção

Sendo: Fluxo unidirecional da espécie j (mol/cm²s);

$J(x)$: Fluxo unidirecional da espécie j (mol/cm²s);

D_j : Coeficiente de difusão da espécie j (cm²/s);

∂C_j : Variação de concentração da espécie j (mol/cm³);

∂x : Variação de distância na direção x (cm);

Z_j : Carga elétrica da espécie j;

F : Constante de Faraday (cal/vol. eq^{-1})

R : Constante de gás (cal/mol.K);

T : Temperatura absoluta (K);

C_j : Concentração volumétrica da espécie j (mol/cm³);

$\partial E(x)$: Variação do potencial em função da direção x;

V : velocidade artificial do íon (cm/s).

A equação acima, classifica o fluxo de massa dentro do concreto através do aparecimento de gradientes, que impulsionam os íons a se deslocarem no interior do concreto. O gradiente de concentração iônica, no processo de difusão; o gradiente do campo elétrico, no processo de migração; o gradiente de umidade, no processo de convecção são as forças motrizes, segundo Nernest-Planc.

Seguindo essa mesma tendência, MEIRA (2004) explica que, ainda podem ocorrer, em situações especiais, outras forças propulsoras de fluxo de massa em concreto. A absorção capilar, cujo gradiente é a tensão superficial nos poros do concreto e a permeabilidade, cujo gradiente é a pressão hidrostática. Esses processos de movimento de íons dentro da massa do concreto podem ocorrer individualmente, ou em combinação, dependendo do teor de umidade, que preenche a rede porosa do concreto, e do estado da água.

DIFUSÃO

O processo de difusão pode ser conceituado como o transporte de íons ocorrido através de uma diferença natural de concentração iônica entre uma região e outra da massa do concreto, sendo o fluxo iônico ocorrendo no sentido de mais baixa concentração. Nesse processo, o meio líquido é de fundamental importância
para que a difusão ocorra.

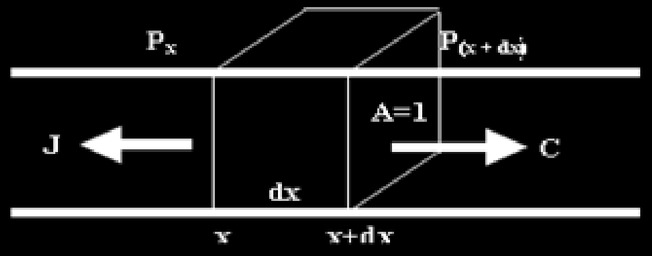
A equação abaixo, derivada de Nernest-Plank, ficou conhecida com a 1ª lei de Fick e define o fluxo de íons ocorridos através de processo difusório de maneira estacionária em relação ao tempo, quando a concentração inicial do elemento é constante, ou seja, não variando com o andamento do processo de difusão.

$$J(x) = -D_j \frac{\partial C_j(x)}{\partial x}$$

Pode ser observado, que o fluxo do elemento iônico ocorre proporcionalmente em relação à concentração desse íon e no sentido da menor concentração, fato esse observado em função do sinal negativo na equação.

MEIRA (2004), comenta ainda que o processo difusório pode ocorrer também de maneira não estacionária, evidenciada por uma variação de concentração da fonte do elemento iônico. Dessa forma, $\frac{\partial C_j}{\partial t} \neq 0$, MEIRA (2004) apud (KRÖP et al, 10995) descreve matematicamente a obtenção dessa expressão:

Representação esquemática da difusão em regime não estacionário



Fonte: MEIRA (2004)

Na faceta Px, $Jx = -D\frac{\partial C_j}{\partial x}$ e na faceta P(x+dx), teremos:

$$J(x+dx) = Jx + \left(\frac{\partial Jx}{\partial x}\right).dx = \left(-D\frac{\partial C_j}{\partial x}\right) - \left(\frac{\partial}{\partial x}D\frac{\partial C_j}{\partial x}.dx\right).$$

Como, $Jx = -D\frac{\partial C_j}{\partial x}$, então:

$$\left(\frac{\partial Jx}{\partial x}\right).dx = -\left(\frac{\partial}{\partial x}D\frac{\partial C_j}{\partial x}.dx\right) \Rightarrow \frac{\partial Jx}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x}D\frac{\partial C_j}{\partial x},$$ sendo o fluxo a variação de volume no tempo, e o volume indica a concentração do elemento iônico em determinado eletrólito, temos que:

$$\left(\frac{\partial Jx}{\partial x}\right). = -\frac{\partial C_j}{\partial t} \Rightarrow \frac{\partial C_j}{\partial t} = -\left(-\frac{\partial}{\partial x}D\frac{\partial C_j}{\partial x}\right) \Rightarrow \frac{\partial C_j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}D\frac{\partial C_j}{\partial x}:$$

$$\boxed{\frac{\partial C_j}{\partial t} = \frac{\partial^2 C_j}{\partial x^2}}$$

MIGRAÇÃO IÔNICA

A migração iônica é um processo de transporte de massa cuja força propulsora é o aparecimento de um campo elétrico, ou seja, um gradiente elétrico. As moléculas dissolvidas na fase aquosa presente na rede de poros do concreto, apresentam-se na forma de cátions e ânions carregados eletricamente. POULSEN et al (2006) e MEIRA (2004) afirmam que essa diferença de potencial elétrico pode ocorrer no concreto em algumas situações: correntes de fugas, processos eletroquímicos de recuperação estrutural, ensaios acelerados, onde os ânions migram em direção ao polo positivo da aplicação da carga e os cátions migram no sentido oposto. O modelo de Nernest-Planc para o movimento de íons em eletrólitos em situações estacionárias, já mencionado acima, explica esse transporte, desprezando-se os termos relativos à convecção e à difusão, como menciona MEIRA (2004).

$$-J(x) = \frac{Z_j F}{RT} D_j C_j \frac{\partial E(x)}{\partial x}$$

Sendo:

$J(x)$: Fluxo unidirecional da espécie j (mol/cm²s);

∂x : Variação de distância na direção x (cm);

Z_j : Carga elétrica da espécie j;

F : Constante de Faraday (cal/vol. eq^{-1})

R : Constante de gás (cal/mol.K);

T : Temperatura absoluta (K);

C_j : Concentração volumétrica da espécie j (mol/cm³);

$\partial E(x)$: Variação do potencial em função da direção x;

CONVECÇÃO

A convecção ocorre no concreto quando é observado uma variação de umidade entre o meio externo (ambiente) e o meio interno (massa do concreto). Esse gradiente de umidade reduz o aporte de água nas regiões superficiais do concreto aumentando a concentração de íons nessa região, ocasionando um fluxo no sentido do interior da massa de concreto para reestabelecer o equilíbrio iônico, ANDRADE et alli (1995).

POULSEN et al (2006) explicam que em estruturas de concreto a evaporação da água na região superficial provoca uma movimentação de mais água em direção a superfície, e essa perda de umidade aumenta a concentração de íons nessa região. Outro caso especial citado pelo mesmo autor, são os ciclos de molhagem e secagem do concreto. O último termo da equação de Nernest-Planc equaciona o processo de convecção.

$$-J(x) = \frac{Z_j F}{RT} D_j C_j \frac{\partial E(x)}{\partial x}$$

Sendo:

$J(x)$: Fluxo unidirecional da espécie j (mol/cm²s);

∂x : Variação de distância na direção x (cm);

Z_j : Carga elétrica da espécie j;

F : Constante de Faraday (cal/vol. eq^{-1})

R : Constante de gás (cal/mol.K);

T : Temperatura absoluta (K);

C_j : Concentração volumétrica da espécie j (mol/cm³);

$\partial E(x)$: Variação do potencial em função da direção x (V);

ABSORÇÃO CAPILAR

A absorção capilar é um fenômeno de transporte de água, e consequentemente dos íons dissolvidos nesse meio, ocasionado pela tensão superficial entre as paredes dos poros do concreto e a água. Essa tensão ocorre em função da forte coesão entre as moléculas de água e da elevada adesão da água a superfícies polares. Quanto menor for o diâmetro dos poros maiores serão as forças oriundas da tensão superficial.

SALES et alli (2014) indicam que esse fenômeno é regido pela equação de Young.

$$\gamma_{SL} + \gamma_{LG} \cos\theta - \gamma_{SG} = 0$$

Onde:

γ_{SL} : Tensão superficial sólido-líquido;

γ_{LG} : Tensão superficial líquido-gás;

θ : ângulo de molhamento;

γ_{SG} : Tensão superficial sólido-gás

PERMEABILIDADE

A permeabilidade é um processo de transporte de massa no concreto que ocorre em função do movimento de água no estado líquido através da rede porosa interconectada do material. Os íons dissolvidos na água presente nos poros se deslocam no sentido do fluxo esse originado em função da presença de um gradiente de pressão hidráulica, ocorrendo em situações específicas em estruturas de concreto armado.

A permeabilidade é o processo de transporte de massa mais influenciado pelas características físicas e geométricas do concreto, abertura e interconectividade dos poros, haja vista, que o fluxo da água em estado líquido sob pressão é tão maior quanto menor for a resistência ao movimento, SALES et alli (2014).

Ainda o mesmo autor, comenta que o gradiente de pressão hidráulica é a força motriz propulsora do processo, e a lei de Darcy é o modelo matemático que o rege. A equação para um fluxo laminar, estacionário, não turbulento e em um meio poroso é:

$$V_f = \frac{K_h . A.h}{L}$$

Onde:

V_f : Velocidade de escoamento;

K_h: Coeficiente de permeabilidade hidráulica;

h : Altura da coluna de água;

L : Comprimento da amostra;

A : Secção do meio poroso;

REFERÊNCIAS

ANDRADE, C.; DIEZ, J. M.; ALAMÁN, A.; ALONSO, C. Mathematical Modelling of electrochemical chloride extraction from concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 25, EUA, 1995.

MEIRA, Gibson Rocha. Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado. UFSC. Tese de Doutorado, 412p. Florianópolis, SC, 2004.

POULSEN, Ervin; MEJLBRO, Leif. Diffusion of chloride in concrete. Taylor & Francis. USA, 2006.

SALES, Almir; SOUSA, Carlos Alberto Caldas de; ALMEIDA, Fernando do Couto Rosa;

CUNHA, Manuel Paulo Teixeira; LOURENÇO, Maria Zita; HELENE, Paulo. Corrosão em estruturas de concreto armado. Elsevier. 1ª Ed. Rio de Janeiro. 2014.