

Métodos de transporte de cloretos em concreto – uma análise crítica e comparativa

OSWALDO CASCUDO - DOUTOR, PROFESSOR (ORCID <https://orcid.org/0000-0003-1879-6396>);

RAYANE CAMPOS LOPES - MESTRE (ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1862-8854>) (clopesrayane@gmail.com);

ANDRIELLI MORAIS DE OLIVEIRA - DOUTORA, PROFESSORA (ORCID <https://orcid.org/0000-0001-8977-785X>) - PPGGECON-UFG

RESUMO

ENSAIOS QUE AVALIAM E QUANTIFICAM O TRANSPORTE DE AGENTES AGRESSIVOS NOS CONCRETOS, COMO OS CLORETOS, POR EXEMPLO, SÃO IMPORTANTES FERRAMENTAS PARA ESPECIFICAÇÃO DO MATERIAL NUMA ABORDAGEM BASEADA NO DESEMPENHO, ASSIM COMO PARA SUBSIDIAR MODELOS PREDITIVOS DE VIDA ÚTIL. O OBJETIVO DESTES ARTIGOS É APRESENTAR QUATRO ENSAIOS DE TRANSPORTE DE CLORETOS EM MATERIAIS CIMENTÍCIOS E COMPARAR AS SUAS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS, A SABER: PERÍODO DE EXECUÇÃO, VANTAGENS, LIMITAÇÕES E APLICABILIDADE. OS MÉTODOS CONSIDERADOS, QUE APRESENTAM DIFERENTES PRINCÍPIOS E REGIMES, SÃO OS SEGUINTE: NT BUILD 443 (MÉTODO DE DIFUSÃO), NT BUILD 492, ASTM C1202 E TESTE LMDC (MÉTODOS DE MIGRAÇÃO). EXCETO PELO MÉTODO DA ASTM, QUE TEM COMO RESPOSTA A CARGA ELÉTRICA PASSANTE

NO CONCRETO, OS PARÂMETROS DE SAÍDA DOS DEMAIS MÉTODOS SÃO DADOS ASSOCIADOS DIRETAMENTE AO TRANSPORTE DE CLORETOS (COEFICIENTES DE DIFUSÃO OU MIGRAÇÃO). DE FORMA CRITERIOSA, OS PARÂMETROS DE TRANSPORTE PODEM SER EMPREGADOS EM MODELOS PREDITIVOS. DENTRE OS MÉTODOS AVALIADOS, A NT BUILD 492 SE DESTACA POR SUA FÁCIL E RÁPIDA EXECUÇÃO, APRESENTANDO OS MELHORES ÍNDICES DE REPETIBILIDADE E REPRODUTIVIDADE.

PALAVRAS-CHAVE: CONCRETO, DURABILIDADE, DIFUSÃO, MIGRAÇÃO, CLORETOS.

1. INTRODUÇÃO

Uma das formas de reduzir impactos ambientais das construções de concreto é conceber obras duráveis, que resistam aos agentes ambientais e de deterioração, con-

siderando a vida útil requerida. Dentro de uma abordagem baseada no desempenho, procura-se garantir que haja uma probabilidade aceitável de se alcançar a durabilidade prevista por meio do cumprimento da vida útil da estrutura. Os modelos preditivos de vida útil são, portanto, ferramentas importantes nessa linha da previsibilidade comportamental ao longo do tempo, uma vez que são capazes de simular a penetração de agentes agressivos no concreto, estimando o tempo para que mecanismos de degradação se instalem e determinem o fim das condições de serviço na estrutura ou em parte dela.

Existem diversos modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos [1]. A maioria deles baseia-se na Segunda Lei de Fick, tendo como um dos principais parâmetros de entrada o coeficiente de difusão ou de migração de cloretos. Para obtenção desses parâmetros, os quais indicam (por conceito) uma menor ou maior velocidade de penetração dos cloretos no meio poroso cimentício, há, na literatura, diferentes métodos.

O objetivo deste artigo é apresentar quatro ensaios de transporte de cloretos em materiais cimentícios, tanto de migração quanto de difusão, e comparar as suas principais características. Dessa forma, um balanço sobre a praticidade e a sensibilidade desses métodos, em termos de aferir suas aptidões em qualificar concretos menos ou mais performantes quanto à penetração de cloretos, é realizado neste documento. O artigo, então, colabora com uma prática recomendada do IBRACON, recentemente editada no tema [2], contribuindo

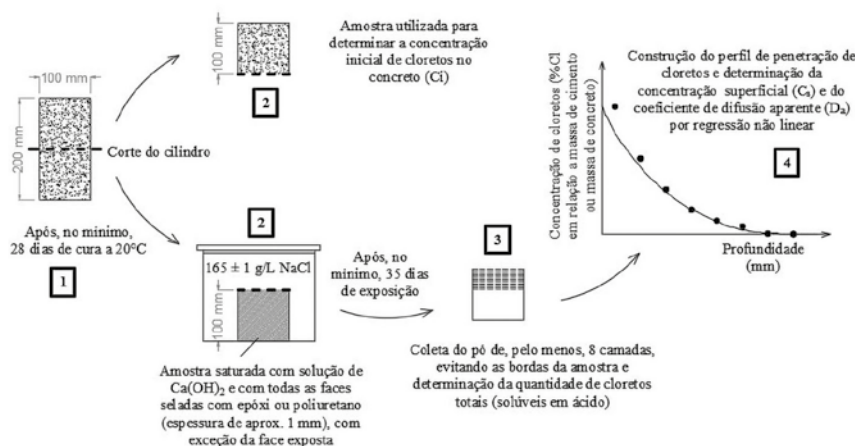


FIGURA 1
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO NT BUILD 443: 1995

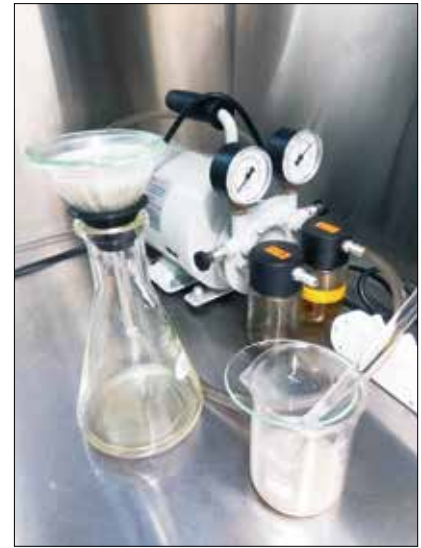
FONTE: OS AUTORES



A



B



C

FIGURA 2

ENSAIO NT BUILD 443: (A) AMOSTRAS, APÓS PRECONDICIONAMENTO, SUBMERSAS EM SOLUÇÃO RICA EM CLORETOS, (B) EXTRAÇÃO DO PÓ, EM CAMADAS, COM O AUXÍLIO DE FURADEIRA DE BANCADA E (C) PARTE DA ETAPA DE DETERMINAÇÃO DA QUANTIDADE DE CLORETOS SOLÚVEIS EM ÁCIDO PRESENTES NO PÓ DO CONCRETO – FILTRAÇÃO A VÁCUO DE SOLUÇÃO APÓS ATAQUE ÁCIDO

FONTE: OS AUTORES

assim, de forma geral, com um conteúdo voltado à normalização brasileira no escopo da durabilidade do concreto e de indicadores para produção de concretos duráveis. De maneira abrangente e complementar, mediante as discussões realizadas, o artigo agrega valor no campo da especificação de concretos duráveis e da previsão de vida útil, reforçando uma linha conceitual importante do desenvolvimento sustentável e da responsabilidade social.

2. MÉTODOS DE ENSAIO DE TRANSPORTE DE CLORETOS

Entre os mecanismos de transporte de cloretos no concreto, o mais recorrente é a difusão, que expressa o fluxo de íons partindo de regiões (porosas) de maior concentração em direção àquelas de menor concentração, em um meio aquoso, podendo ocorrer em estado estacionário ou não estacionário. Ensaio puros de difusão em estado estacionário (o fluxo de difusão é constante com o tempo e não há fixação de cloretos na matriz cimentícia) requerem muito tempo de execução, especialmente em amostras de concreto (na comparação com amostras de argamassa, que, em

geral, são mais porosas). Por isso, muitas vezes são empregados ensaios acelerados, os chamados ensaios de migração, que aplicam um campo elétrico visando acelerar o fluxo de cloretos.

Dentre os vários métodos existentes, apresentam-se, neste artigo, quatro deles, cujas descrições sumárias e principais informações constam a seguir:

- Ensaio de difusão em estado não estacionário, preconizado pela NT Build 443: 1995 [3];
- Ensaio de migração em estado não estacionário, preconizado pela NT Build 492: 1999 [4];
- Ensaio de penetração de cloretos (pela carga elétrica passante), preconizado pela ASTM C1202: 2022 [5];
- Ensaio de migração em estado estacionário - ensaio LMDC [6] - desenvolvido pelo Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), do INSA/Toulouse (Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse), na França.

Os referidos métodos são muito empregados em escala mundial por traduzirem, com certa praticidade, o transporte de cloretos no concreto, contribuindo tanto para que

se possa avaliar a capacidade (maior ou menor) do material em resistir à penetração dos cloretos, como para gerar parâmetros voltados a subsidiar modelos preditivos de vida útil. Nesse contexto, é importante destacar que não existe normalização técnica no país que contemple ensaios de cloretos em materiais cimentícios, sendo, então, o conteúdo deste artigo uma contribuição à discussão desses métodos, seguindo a linha da Prática Recomendada do IBRACON intitulada: "Procedimento de ensaios de difusão de difusão e migração de cloretos visando à estimativa de VUP em concretos" [2].

2.1 Esquemas ilustrativos dos métodos – principais etapas dos ensaios

A seguir, são descritos os 4 métodos de transporte de cloretos, objeto de discussão do presente artigo.

2.1.1 MÉTODO DE DIFUSÃO EM ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO – NT BUILD 443

As Figuras 1 e 2 trazem a representação esquemática das principais etapas da

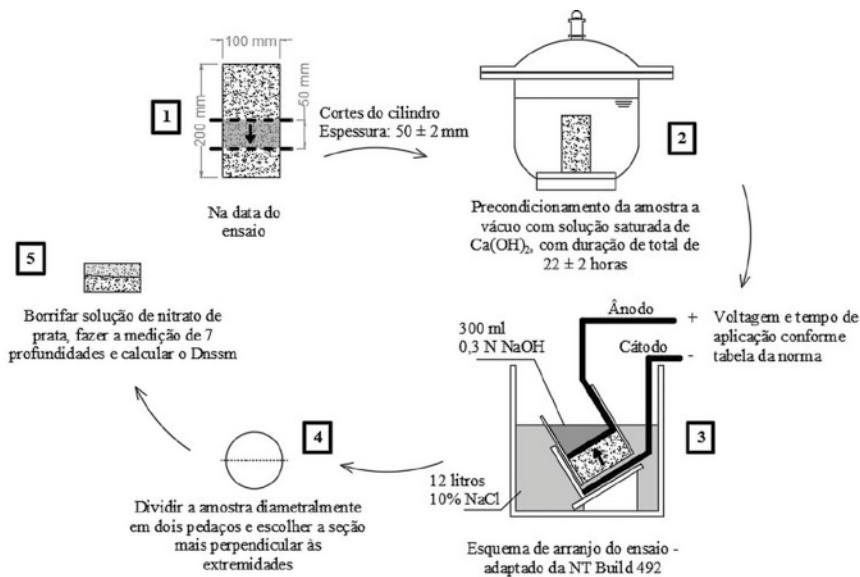


FIGURA 3
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO NT BUILD 492: 1999

FONTE: OS AUTORES

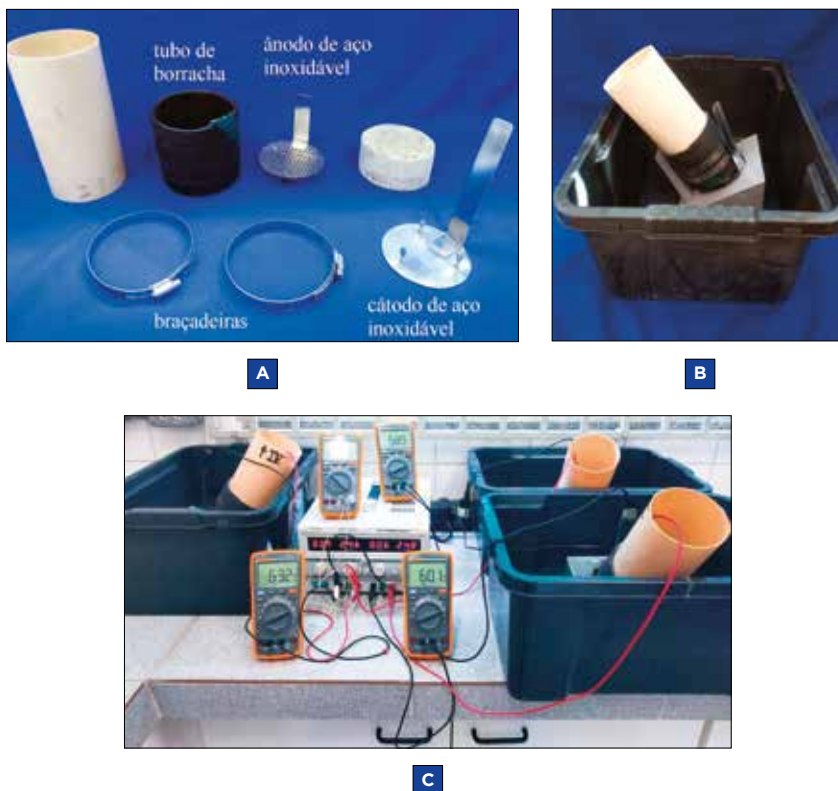


FIGURA 4
ENSAIO NT BUILD 492: 1999: (A) PARTE DOS ELEMENTOS NECESSÁRIOS PARA SUA REALIZAÇÃO, (B) APARATO MONTADO E (C) ENSAIO DE AMOSTRAS EM TRIPLICATA EM ANDAMENTO

FONTE: OS AUTORES

NT Build 443 e algumas fotos ilustrativas dessas etapas, respectivamente.

O ensaio de difusão em estado não estacionário (NT Build 443: 1995) consiste em submeter amostras de concreto, após acondicionamento, a uma solução rica em cloretos (concentração de 165 ± 1 g/L de NaCl) por, no mínimo, 35 dias. A temperatura dessa solução de exposição deve ser monitorada pelo menos uma vez por dia e deve estar entre 21°C e 25°C . A solução deve ser agitada uma vez por semana e trocada a cada 5 semanas.

Para se obter os parâmetros desejados, é necessária a construção do perfil de penetração de cloretos (concentração de cloretos com a profundidade da amostra de concreto) e a realização de uma regressão não linear dos dados experimentais com a Segunda Lei de Fick, apresentada na Equação 1:

$$[1] \quad C_{(x,t)} = C_s - (C_s - C_i) \left(\operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 D_a t}} \right) \right)$$

Em que:

$C_{(x,t)}$ = concentração de Cl^- medida na profundidade x e tempo de exposição t (% Cl^- em relação à massa de cimento ou massa de concreto);

C_s = condição de fronteira da superfície exposta (% massa), também chamada de concentração superficial de cloretos;

C_i = concentração inicial de cloretos (% massa);

x = profundidade de cada camada abaixo da superfície exposta (m);

t = tempo de exposição, com precisão melhor do que 5 horas (s);

D_a = coeficiente de difusão aparente (m^2/s);

erf = função de erro de Gauss.

2.1.2 MÉTODO DE MIGRAÇÃO EM ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO - NT BUILD 492

Uma descrição sumária do método NT Build 492 pode ser vista nas Figuras 3 e 4.

O ensaio de migração em estado não estacionário da NT Build 492: 1999 consiste em, após acondicionamento das amostras, aplicar um campo elétrico externo, para acelerar a passagem do íon cloreto

¹ A NORMA NT BUILD 443 NOMEIA ESSE PARÂMETRO COMO COEFICIENTE DE TRANSPORTE EFETIVO DE CLORETOS. PORÉM, POR SE TRATAR DE UM ENSAIO DE DIFUSÃO EM ESTADO NÃO ESTACIONÁRIO, SEGUINDO A NOMENCLATURA MAIS USUAL ADOTADA, OPTOU-SE POR CHAMÁ-LO DE COEFICIENTE DE DIFUSÃO APARENTE.

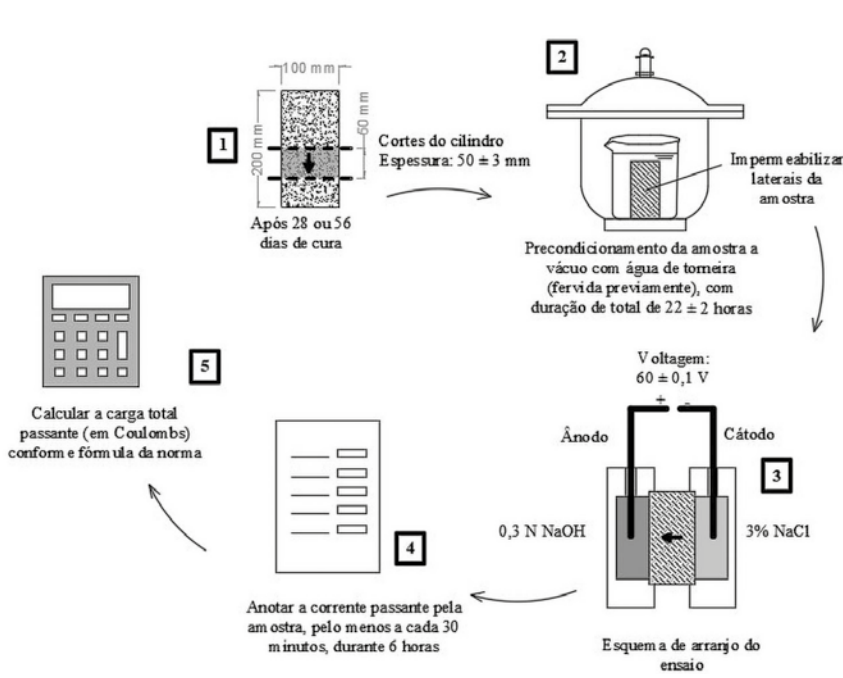


FIGURA 5
REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO ASTM C1202: 2022

FONTE: OS AUTORES

da solução do cátodo para a solução do ânodo, através da amostra de concreto. A voltagem aplicada e o seu tempo de duração dependerão da corrente inicial obtida ao ligar a fonte em 30 V, seguindo tabela 1 da norma. O coeficiente de migração em estado não estacionário (D_{nssm}) é calculado conforme a Equação 2, a partir de uma média da profundidade de penetração de cloretos (x_d), sendo este parâmetro obtido por medição manual, após a aspersão de um indicador à base de nitrato de prata na seção fragmentada do corpo de prova ao final do ensaio (trata-se de método colorimétrico, que, por contraste de cores, indica o avanço da frente de cloretos).

$$[2] \quad D_{nssm} = \frac{0,0239 (273 + T)L}{(U - 2)t}$$

$$\left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273 + T) L x_d}{U - 2}} \right)$$

Em que:

- D_{nssm} = coeficiente de migração em estado não estacionário ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$);
- U = valor absoluto da voltagem aplicada (V);
- T = média das temperaturas inicial e final da solução anódica (°C);

- L = espessura da amostra de concreto (mm) - média obtida de três medidas;
- x_d = valor médio da profundidade de penetração de cloretos (mm), obtido de 7 medidas individuais;
- t = tempo de duração do ensaio (horas).

A NT Build 492: 1999 traz, como ação opcional, a determinação da concentração superficial de cloretos (totais solúveis em ácido) de uma fatia de 5 mm de espessura, retirada da outra amostra dividida axialmente, que não passou pela etapa 5 (destacada na Figura 3).

2.1.3 MÉTODO DE PENETRAÇÃO DE CLORETOS PELA CARGA ELÉTRICA PASSANTE - ASTM C1202

O método da ASTM C1202 está destacado nas Figuras 5 e 6. Ele também é conhecido internacionalmente como RCPT (*Rapid Chloride Permeability Test*), traduzido como teste rápido de permeabilidade a cloretos.

Diferentemente dos demais ensaios apresentados, o teste da ASTM C1202 não resulta em um coeficiente de difusão ou de migração. Esse ensaio consiste em determinar a carga elétrica total que atravessa os concretos, como forma de indicar, indiretamente, a resistência desse material à penetração de cloretos. Há, portanto, uma associação entre a carga elétrica passante e o transporte de cloretos, já que estes íons são partículas carregadas eletricamente. Após processo de condicionamento, uma amostra cilíndrica de concreto com 50 mm de espessura é colocada entre duas células, sendo uma face exposta a uma

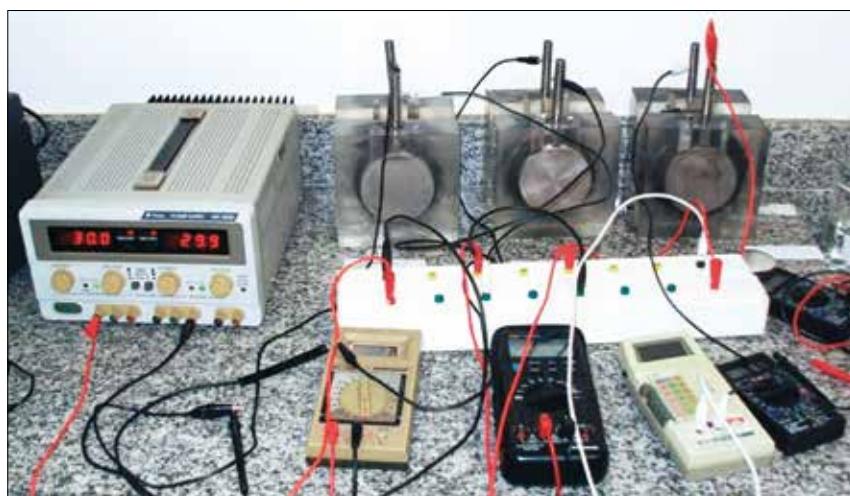


FIGURA 6
EXEMPLO DE ENSAIO ASTM C1202: 2022 EM TRIPLICATA (EM ANDAMENTO)

FONTE: CARASEK ET AL. (2011) [7]

TABELA 1

PENETRABILIDADE DE CLORETOS BASEADA NA CARGA ELÉTRICA PASSANTE

Carga passante (coulombs)	Penetrabilidade de cloretos
> 4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baixa
100 - 1000	Muito baixa
< 100	Insignificante

FONTE: TRADUZIDA DA ASTM C1202

solução de NaCl (3% em massa) e a outra a uma solução de NaOH (0,3 N). Aplica-se uma alta voltagem (60 V) durante 6 horas, monitorando, pelo menos a cada 30 minutos, a corrente medida. A carga passante é calculada conforme Equação 3.

$$[3] \quad Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360})$$

Em que:

Q = carga passante (C);

I_0 = corrente imediatamente após aplicação da voltagem no começo do ensaio (A);
 I_t = corrente a t minutos após o início da aplicação da voltagem (A).

De modo a auxiliar na interpretação dos resultados, a ASTM C1202 apresenta critérios de avaliação da penetrabilidade de cloretos com base nos valores de carga passante, como se pode observar na Tabela 1.

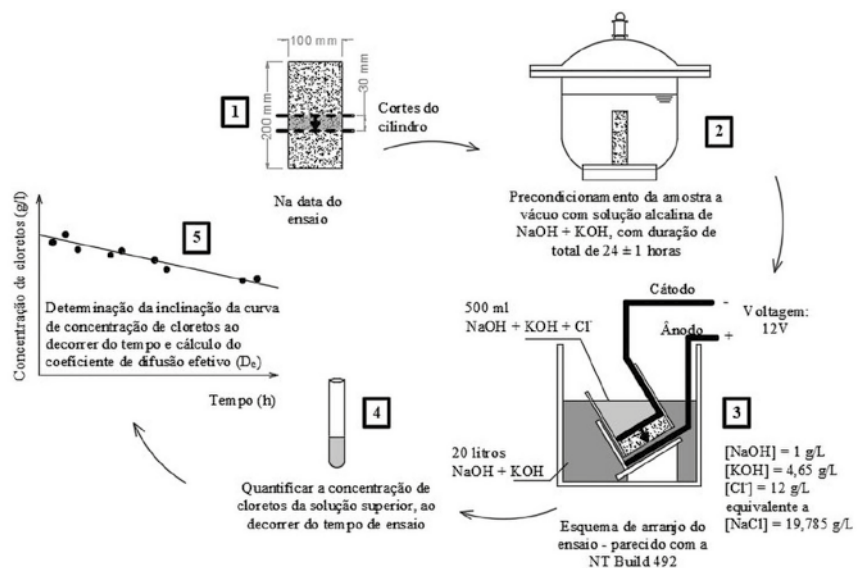


FIGURA 7

REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO TESTE LMDC

FONTE: OS AUTORES

2.1.4 MÉTODO DE MIGRAÇÃO EM ESTADO ESTACIONÁRIO - ENSAIO LMDC

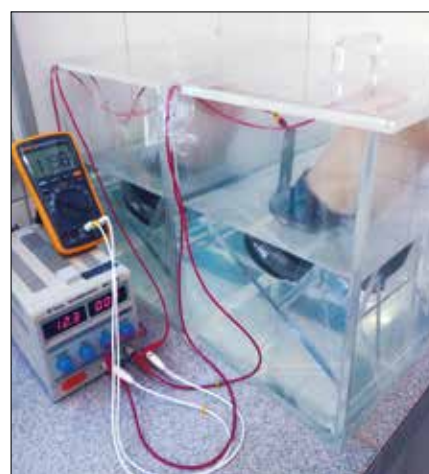
O último ensaio a ser apresentado é o método LMDC, que pode ser visto nas Figuras 7 e 8.

O aparato utilizado no teste LMDC para aplicação da tensão pode ser o mesmo do ensaio NT Build 492, atentando-se para as diferenças entre os métodos. No teste LMDC, aplica-se uma voltagem de

12 V para acelerar a migração de cloretos da solução superior para a solução inferior (soluções padronizadas de NaOH e KOH para simular a solução do poro), através de uma amostra preconditionada de concreto de 30 mm de espessura. Por ser um ensaio de migração em estado estacionário, o tempo do ensaio é bem maior do que os demais, em torno de 15 dias. Pelo monitoramento da diminuição da concentração de cloretos na solução superior (dado o processo migratório que



A



B



C

FIGURA 8

TESTE LMDC: (A) PARTE DO PRECONDICIONAMENTO DAS AMOSTRAS COM AUXÍLIO DE DESSECADOR, (B) ENSAIO DE AMOSTRAS EM DUPLICATA (EM ANDAMENTO) E (C) TITULAÇÃO FEITA POR TITULADOR AUTOMÁTICO PARA MONITORAMENTO DA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS DA SOLUÇÃO SUPERIOR

FONTE: OS AUTORES

TABELA 2

COMPARATIVO ENTRE OS MÉTODOS DE ENSAIO

	NT Build 443	NT Build 492	ASTM C1202	Teste LMDC
Princípio do método	Difusão em estado não estacionário. Amostra submersa em solução de 165 ± 1 g/L de NaCl. Construção do perfil de penetração de cloretos. Regressão não linear.	Migração em estado não estacionário. Voltagem: 10 a 60 V, conforme tipo de material. Método colorimétrico. Profundidade de penetração de cloretos	Migração em estado não estacionário. Voltagem: 60 V. Monitoramento da corrente passante a cada 30 minutos.	Migração em estado estacionário. Voltagem: 12 V. Monitoramento da concentração de cloretos da solução superior.
Tratamento prévio da amostra	Saturação da amostra em solução saturada de Ca(OH) ₂ . Impermeabilização de todas as faces, com exceção da face a ser exposta à solução, com revestimento de epóxi ou poliuretano com espess. ≈ 1 mm. Saturação da amostra novamente em solução saturada de Ca(OH) ₂ .	Amostras no vácuo por 3 horas. Saturação por 19 ± 2 horas em solução saturada de Ca(OH) ₂ , sendo a primeira hora ainda a vácuo.	Impermeabilização das laterais das amostras. Vácuo por 3 horas, dentro de becker. Saturação por 19 ± 2 horas em água após ebulição, sendo a primeira hora ainda a vácuo.	Amostras no vácuo por 4 h. Saturação a vácuo por 20 ± 1 horas em solução de NaOH (1 g/L) e KOH (4,65 g/L).
Tamanho da amostra	Φ mínimo 75 mm e maior que 3 x DMC do agregado graúdo. Altura mín.: 100 mm.	Φ: 100 mm. Espessura: 50 ± 2 mm.	Φ: 100 mm. Espess.: 50 ± 3 mm.	Φ: 100/110 mm. Espess.: 30 mm.
Duração do ensaio	Precond.: ≈ 10 dias. Exposição/submersão: no mínimo 35 dias. Perfil de penetração de cloretos: ≈ 10 dias.	Precond.: 1 dia. Voltagem: 1 a 4 dias.	Precond.: ≈ 2 dias. Voltagem: 6 horas.	Precond.: 1 dia. Voltagem: ≈ 14 dias.
Parâmetros obtidos	D _a - coeficiente de difusão aparente. C _s - Concentração superficial de cloretos.	D _{nssm} - coeficiente de migração em estado não estacionário.	Q - carga passante.	D _e - coeficiente de difusão efetivo.
Vantagens	Processo de difusão (menos acelerado), o que aproxima o ensaio do fenômeno natural.	Ensaio de fácil execução Aparato simples. Boa repetibilidade e reprodutividade.	Ensaio rápido. Fácil execução. Boa repetibilidade e reprodutividade.	Ensaio sob estado estacionário (melhor caracterização do transporte efetivo).
Limitações	Ensaio demorado, com várias etapas, podendo acumular erros. Necessidade de bom conhecimento de química: titulação.	Método colorimétrico de indicação da frente de cloretos (x _d): forma indireta de medição, podendo acumular erros.	Resultado não pode ser usado em modelos preditivos. Aplica uma tensão muito elevada (60 V). Aumento da temperatura da solução, com risco de fervura.	Maior variabilidade de resultados. Necessidade de maior conhecimento de química: titulação.

FONTE: OS AUTORES

transporta cloretos), é possível calcular o coeficiente efetivo de difusão (D_e) pelas equações 4 e 5.

$$[4] \quad J_{up} = \frac{\Delta C_{up} V}{\Delta t S}$$

Em que:

J_{up} = fluxo de cloretos que deixa a solução superior, catódica, rica em cloretos (mol/m².s);
ΔC_{up}/Δt = inclinação da curva obtida pelos dados de concentração de cloretos da solução catódica ao longo do tempo, determinada graficamente por meio de ajuste matemático dos pontos experimentais via regressão linear (mol/m³.s);

V = volume da solução catódica (m³);
S = área da amostra testada exposta à solução de cloretos (m²) - média obtida de duas medidas de diâmetro.

$$[5] \quad D_e = \frac{RT J_{up}}{C_{up1} F E}$$

Em que:

D_e = coeficiente de difusão efetivo², obtido pelo ensaio LMDC (m²/s);
R = constante universal dos gases, R = 8,314 J/(K.mol);
T = temperatura média da solução catódica durante o ensaio (K);
C_{up1} = concentração inicial de cloretos (no

tempo zero), obtida pela curva originada da regressão linear (mol/m³);
F = constante de Faraday, F = 96.487 J/(V.mol);
E = campo elétrico aplicado (V/m), calculado a partir da média de quatro espessuras das amostras.

2.2 Comparação entre métodos

A Tabela 2 traz as principais características dos métodos descritos anteriormente, permitindo sua melhor comparação.

Como mostrado na Tabela 2, todos os ensaios precisam pré-condicionar as

² APESAR DO ENSAIO SER DE MIGRAÇÃO, OS COEFICIENTES OBTIDOS NA MIGRAÇÃO E NA DIFUSÃO, NO ESTADO ESTACIONÁRIO, SÃO IGUAIS. POR ISSO, O RESULTADO DO LMDC É CHAMADO DE COEFICIENTE DE DIFUSÃO EFETIVO (D_e).

amostras, sendo mais demorado e trabalhoso o procedimento da NT Build 443. O ensaio de mais rápida execução é o da ASTM C1202, cujo tempo de aplicação de voltagem é o mais reduzido, em torno de 6 horas. Apesar dessa rapidez, esse ensaio tem como grande desvantagem o fato de não expressar de forma direta as propriedades de transporte dos cloretos, como, por exemplo, ocorre com os outros métodos, os quais resultam em parâmetros específicos de transporte de massa (coeficientes de difusão ou de migração). A carga elétrica passante obtida no método ASTM C1202 é, portanto, um parâmetro indireto da penetração de cloretos, que se associa muito mais à condutividade do meio poroso (dada pela presença de diferentes íons na solução do poro) do que ao mecanismo exclusivo do transporte iônico de cloreto. Por esta razão, principalmente, esse dado qualitativo de carga passante não se aplica a modelos preditivos de vida útil. Por outro lado, o método demonstra uma sensibilidade muito boa para diferenciar e classificar concretos quanto à sua capacidade de proteção em relação aos cloretos, como discutido por Carasek *et al.* (2011) [7].

Os diferentes coeficientes obtidos (difusão ou migração) podem ser usados em modelos preditivos, desde que as condições da situação analisada sejam semelhantes às condições de ensaio. Como todos os três ensaios tratados são acelerados (seja pela aplicação de campo elétrico externo ou pelo uso de alta concentração de cloretos), deve-se ter o cuidado de correlacionar esses coeficientes com os coeficientes obtidos de estruturas reais, procedendo-se às devidas correções e ajustes nos modelos. Cabe destacar que o coeficiente obtido em estado estacionário (D_e) é muito menor que os calculados em es-

tado não estacionário (D_a e D_{nssm}), sugerindo que os mecanismos de transporte em regime estacionário se aproximam muito mais do fenômeno natural. Entre estes três ensaios, o de mais fácil execução e o que apresenta os melhores índices de repetibilidade e reprodutibilidade é o NT Build 492.

De forma geral, independentemente de se apropriar parâmetros oriundos desses ensaios em modelos preditivos de vida útil, uma aplicabilidade inerente a todos os quatro métodos avaliados neste artigo reside na capacidade que eles têm de diferenciar concretos quanto ao seu desempenho frente à penetração de cloretos. Dessa forma, tais metodologias podem representar importantes meios voltados à concepção e ao controle de concretos performatos em ambientes contendo cloretos, contribuindo assim com a durabilidade de estruturas de concreto (notadamente em atmosferas marinhas).

3. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou as principais características de quatro ensaios de transporte de cloretos no concreto: principais etapas, princípio do método, tratamento prévio e tamanho das amostras, duração, parâmetros obtidos, vantagens e limitações. Os quatro métodos são baseados em princípios diferentes e a opção pelo mais adequado dependerá de alguns fatores como tempo disponível para realização do ensaio, aparato e objetivo da análise. De modo geral, o conteúdo deste artigo deixa uma contribuição voltada ao amadurecimento técnico e científico que deve ocorrer no âmbito de comissões de estudos, visando à normalização no campo da durabilidade do concreto.

O método de RCPT (ASTM C1202) é qualitativo e apresenta limitações importantes no tocante à descrição do transporte de cloretos, mas pode ser usado na comparação de diferentes concretos (com boa sensibilidade para isso), tendo como vantagem sua rápida execução.

Os testes nórdicos (NT Build 443 e NT Build 492) são métodos de difusão e migração no estado não estacionário, enquanto o teste LMDC é um ensaio de migração no regime estacionário. Os coeficientes obtidos por meio desses ensaios podem ser usados em modelos preditivos para estimar a vida útil de estruturas de concreto sujeitas à corrosão das armaduras induzida por cloretos, tomando-se os devidos cuidados com as hipóteses consideradas. Entre esses três métodos, o de mais fácil e rápida execução, e que apresenta os melhores índices de repetibilidade e reprodutibilidade, é o da NT Build 492. O ensaio do LMDC, por trabalhar em regime estacionário num processo de mais longa duração, gera um parâmetro de transporte mais próximo dos mecanismos reais de penetração de cloretos em estruturas de concreto.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto de P&D — PD. 0394-1704-2017, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica — ANEEL, desenvolvido pela Eletrobrás FURNAS e FUNAPE/UFG/EECA/LABITECC. Os autores expressam agradecimento a todos esses parceiros, bem como ao CNPq — Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e à CAPES — Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelas bolsas concedidas aos pesquisadores autores deste artigo. ©

▶ REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LOPES, R. C.; OLIVEIRA, A. M.; CASCUDO, O. Modelos preditivos de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à iniciação da corrosão de armaduras por cloretos: contribuição ao estado da arte por meio de revisão sistemática da literatura - Parte 1. Revista Matéria (UFRJ), v. 27, n. 2, p. 1-20, 2022.
- [2] MEIRA, G. R.; PINTO, S. A.; DIAS, C. M. R.; RIBEIRO, D. V.; MAGALHAES, F. C.; AMORIM JR, N. S.; CASCUDO, O. Procedimento de ensaios de difusão e migração de cloretos visando à estimativa de VUP em concretos. In: RIBEIRO, D. V.; MEIRA, G. R. (Orgs.). Prática Recomendada IBRACON (Comitê Técnico IBRACON/ALCONPAT 702). 1ed. São Paulo: IBRACON, 2021, v. 1, p. 1-48.
- [3] NORDTEST. NT BUILD 443. Concrete, Hardened: accelerated chloride penetration. Finland, 1995, 5 p.
- [4] NORDTEST. NT BUILD 492. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Finland, 1999, 8 p.
- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. C1202 - Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2022, 8 p.
- [6] TRUC, O.; OLLIVIER, J. P.; CARCASSÈS, M. A new way for determining the chloride diffusion coefficient in concrete from steady state migration test. Cement and Concrete Research, v. 30, p. 217-226, 2000.
- [7] CARASEK, H.; CASCUDO, O.; FERREIRA, R. B.; CUBAYNES, M. P. Y.; OLLIVIER, J.-P. L'essai AASHTO T 277 et la protection des bétons contre la corrosion des armatures. European Journal of Environmental and Civil Engineering, v. 15, p. 49-75, 2011.