

Analysis of chloride diffusivity in concrete containing red mud

Análise da difusão de cloretos no concreto contendo lama vermelha



D.V. RIBEIRO ^a
verasribeiro@hotmail.com

J.A. LABRINCHA ^b
jal@ua.pt

M.R. MORELLI ^c
morelli@power.br

Abstract

Red mud is a solid waste produced in the alumina production process and, due to its high pH, is classified as hazardous. Its incorporation in concrete mixtures, acting as filler due to the particles fineness, might be an interesting reuse alternative. The focus of this paper is to study the chloride diffusivity of concrete mixtures containing red-mud. The concentration of chlorides was monitored by measuring the conductivity of the anolyte, which was distilled water initially. In addition, the estimation of the chloride ions diffusion coefficients in steady and non-steady conditions, D_s and D_{ns} , was obtained from the “time-lag” and “equivalent time” between diffusion and migration experiments. Due to superfine particle-size distribution and the “filler” effect, the red mud addition seems to assure lower chloride diffusivity.

Keywords: concrete, red mud, chloride diffusion, corrosion.

Resumo

A lama vermelha é um resíduo sólido gerado no processo de produção de alumina e, devido a seu elevado pH, é considerado “perigoso”. A característica de elevada alcalinidade associada à presença de aluminossilicatos facilitam a assimilação e formação de compostos pela reação com os íons cloreto. No presente estudo, a concentração de cloretos foi monitorada por meio da medida da condutividade do ânólito, que inicialmente era água destilada. Adicionalmente, foram estimados os coeficientes de difusão nos estados estacionário e não-estacionário, obtidos através do “time lag” e do “tempo equivalente” de medida. Os resultados obtidos mostraram que a adição da lama vermelha é benéfica ao concreto, reduzindo a taxa migração dos cloretos (coeficientes de difusão) devido à elevada finura da lama vermelha (efeito filler) e à ação dos aluminossilicatos.

Palavras-chave: concreto, lama vermelha, difusão de cloretos, corrosão.

^a Universidade Federal da Bahia, Departamento de Ciência e Tecnologia dos Materiais, verasribeiro@hotmail.com, Escola Politécnica - Rua Aristides Novis, 02, Federação, 40210-630. Salvador/BA, Brasil;

^b Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro, jal@ua.pt, Campus Universitário de Santiago, 3810-193. Aveiro, Portugal;

^c Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia de Materiais, morelli@power.br, Rodovia Washington Luis, Km 235. 13566-550. São Carlos/SP, Brasil.

1. Introdução

O grande volume de resíduos gerados é um dos maiores problemas da sociedade moderna, com uma geração superior a 25 milhões de toneladas anualmente apenas em São Paulo [1]. A lama vermelha estudada neste trabalho é um subproduto da indústria de beneficiamento da alumina, a partir do processo Bayer, quando a bauxita é transformada em alumina calcinada, que é a primeira etapa até se chegar ao alumínio metálico. Sua grande geração requer possibilidades de reutilização que consumam estas grandes quantidades, como a construção civil, por exemplo.

A produção mundial de bauxita em 2009 foi de cerca de 205 milhões de toneladas, e os principais países produtores foram Austrália, China, Brasil, Guiné, Índia e Jamaica. Ocupando a 3ª posição no ranking mundial em 2009, o Brasil produziu 26,6 milhões de toneladas de bauxita, possuindo também a terceira maior reserva de minério de bauxita do mundo (cerca de 3,5 bilhões de toneladas), concentrado principalmente no norte do país (estado do Pará) [2]. Entre 0,3-1,0 tonelada de lama vermelha são gerados para cada tonelada de alumínio produzido. Cerca de 10,6 milhões de toneladas de lama vermelha cáustica são descartadas anualmente durante os últimos anos no Brasil, enquanto a geração mundial atinge mais de 117 milhões de toneladas/ano [3].

Aproximadamente 35 a 40% do minério de bauxita são perdidos e dispostos como uma borra altamente alcalina [4]. O teor de sólidos da lama é de cerca de 60% e é constituído por partículas extremamente finas. Como consequência, a área superficial é elevada e a lama vermelha mostra elevada capacidade de absorção de água. Matrizes alcalinas como as de cimento Portland são comumente usadas no acondicionamento de resíduos por serem relativamente baratas, serem bastante conhecidas e de tecnologia facilmente acessível. Além disso, sua elevada alcalinidade reduz a solubilidade de muitos resíduos inorgânicos tóxicos e perigosos, inibe os processos microbiológicos e, por necessitarem de água para a hidratação, podem incorporar resíduos líquidos e pastosos [5], como o resíduo gerado no processo de produção de alumínio.

A busca por alternativas ambientalmente e economicamente viáveis de reciclagem incluem aplicações da lama vermelha como adsorvente para a remoção de cádmio, zinco e arsênio, flúor, chumbo e cromo em soluções aquosas [6], como componente de materiais de construção, tais como tijolos [7], cerâmicas e telhas [8], esmaltes [9], como compósitos de base polimérica para substituir a madeira [10], cimentos ricos em ferro [11, 12], como um componente do clínquer [4, 11, 12], e a sua adição às formulações de argamassa e concreto também foi relatada [13]. A utilização como material de construção comum tem sido sugerida como uma alternativa que garante altas taxas de consumo [14].

Em estruturas de concreto, é largamente aceito que a presença dos íons cloreto é responsável por causar uma quebra localizada na camada passiva e subsequente corrosão nas barras de aço da armadura.

Diversas pesquisas [15, 16, 17] vêm utilizando os ensaios de migração para avaliar a resistência do concreto à penetração de íons cloreto. Inicialmente, estes ensaios eram utilizados para avaliar a penetrabilidade dos íons cloreto por meio da avaliação da carga total passante, conforme a ASTM C 1202/1992, e o coeficiente de difusão de cloretos no estado estacionário, conforme a proposta de ANDRADE [15]. Mais recentemente, alguns autores têm utilizado ensaios de migração para calcular o coeficiente de difusão

também no estado não-estacionário [16, 17]. Em função do objetivo proposto, os ensaios podem apresentar variações no procedimento a ser adotado e nos parâmetros a serem coletados, porém todos se baseiam na indução do movimento dos íons sob a ação de um campo elétrico externo [18].

O ensaio de migração tem como princípio a aplicação de uma diferença de potencial entre duas células: uma contendo uma solução de cloretos, célula catódica, e outra sem cloretos, célula anódica, entre as quais é colocada a amostra de concreto a ser analisada. O potencial elétrico externo aplicado força a passagem dos íons cloreto através da amostra de concreto da primeira para a segunda célula. Neste método, o transporte dos íons cloreto através do corpo de prova é induzido pela corrente elétrica gerada devido à diferença de potencial de 12 volts aplicada por uma fonte de corrente contínua por meio dos eletrodos contidos em cada célula. A célula positiva, célula anódica, é preenchida com água destilada para evitar a corrosão induzida pela deposição do cloro. A solução utilizada na célula negativa, célula catódica, é composta por cloreto de sódio (NaCl) a uma concentração de 1 M.

2. Materiais e métodos

2.1 Materiais

O concreto foi produzido com um cimento CP II Z-32. Este cimento apresenta pozolanas em sua composição, sendo um dos mais vendidos no estado de São Paulo, Brasil. O agregado graúdo (brita) utilizado foi proveniente de rocha granítica e o agregado miúdo foi uma areia de rio disponível comercialmente em São Carlos, SP. A lama vermelha utilizada foi proveniente da ALCOA do Brasil, em Poços de Caldas. É constituída basicamente por 60% de partículas sólidas, tendo sido coletada imediatamente após a produção de alumina, em seu processo de digestão (Processo Bayer).

2.2 Métodos

2.2.1 Caracterização das Matérias primas e Dosagem do Concreto

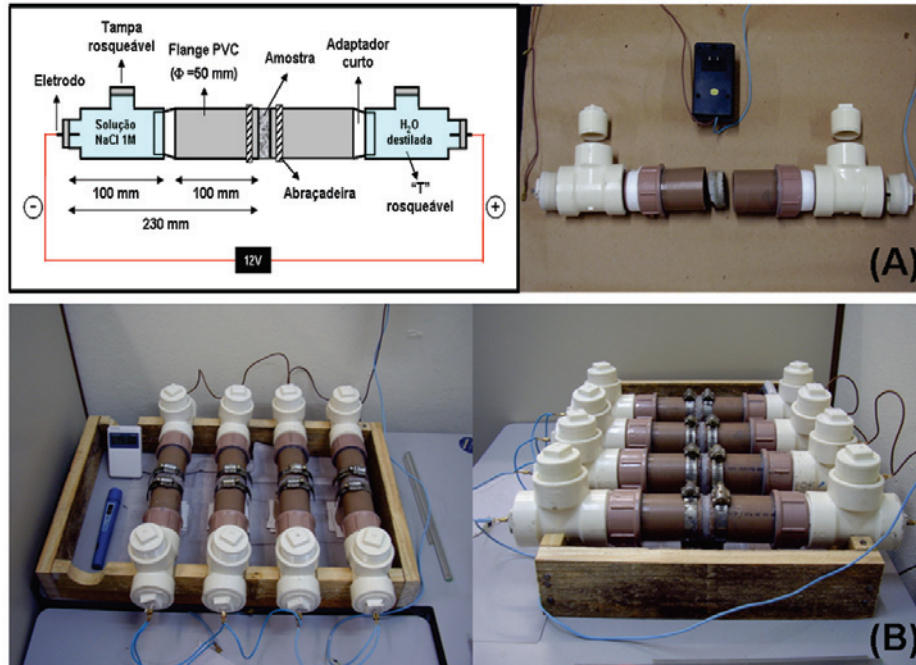
A caracterização dos materiais envolveu a difração de raios-X, DRX, (Difratômetro Rigaku Geirgflex ME 210GF2) e análise de fluorescência por raios-X, FRX, (Philips PW1480 X-ray Fluorescence Spectrometer), enquanto os parâmetros físicos tais como área superficial específica (estimados por BET, usando um equipamento Micrometrics Gemini 2370 V1.02) e peso específico (Pícnômetro a Hélio Accupyc 1330 V2.01 da Micrometrics) também foram determinados.

O traço do concreto utilizado neste estudo foi de 1,0 : 1,5 : 1,3 : 0,5 (cimento : areia : brita : água). O teor de argamassa foi de 75% e o consumo de cimento igual a 526 kg/m³. Após a mistura em betoneira, foi usada mesa vibratória para uma melhor compactação. Concretos contendo distintos teores de lama vermelha (10, 20 e 30% em relação à massa de cimento) foram preparados e analisados.

As amostras utilizadas nos ensaios de migração foram discos com 40 mm de espessura, extraídos do interior de corpos de prova cilíndricos (50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento), com o objetivo de reduzir os efeitos das heterogeneidades de moldagem.

2.2.2 Ensaio de migração de cloretos

Figura 1 - (A) Esquema e montagem do aparato para a realização do ensaio de migração de cloretos; (B) Realização do ensaio de migração de cloretos



A Norma americana ASTM C-1202/97 (“Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration”) preconiza a utilização do processo de saturação a vácuo das amostras antes da execução dos ensaios de migração. Este procedimento tem sido adotado por outros pesquisadores [11, 16] para garantir que o ingresso de cloretos na amostra se dê predominantemente por difusão. Neste trabalho, a utilização da saturação a vácuo não foi utilizada. A solução adotada foi manter a amostra em água durante 24 horas antes da realização do ensaio, como proposto por SANTOS [18].

Para a execução de ensaio, foram utilizadas células de PVC constituídas por um flange de 100 mm, um “T” rosqueável, com uma tampa superior para realizações de medidas e uma lateral, contendo o eletrodo, devidamente selada para evitar a perda das soluções.

Os corpos de prova foram colocados na interface das duas células, sendo também colados com adesivo à base de silicone e auxílio de um par de abraçadeiras. Assim, a troca iônica entre as células deu-se somente através da área exposta da superfície do corpo de prova. O esquema do ensaio e sua realização são apresentados nas Figuras 1a e 1b, respectivamente. A tensão de 12 Volts foi aplicada ao sistema por meio de eletrodos posicionados nas extremidades do sistema, que estavam conectados a fios de cobre provenientes de uma fonte de tensão controlada.

A condutividade elétrica da solução da célula anódica, inicialmente sem cloretos, foi analisada diariamente durante todo o ensaio. Assim, obteve-se a evolução da condutividade elétrica da solução utilizando o Condutivímetro Digital Portátil tipo caneta modelo CD-880 da marca Instrutemp e, em seguida, fez-se uma estimativa da concentração de cloretos empregando a correlação obtida experimentalmente entre a concentração de íons cloreto (Cl⁻) e a condutividade elétrica (Figura 2). A condutividade foi verificada a uma

temperatura de 25 °C, e uma variação de 2% nos valores deve ser considerada para uma variação de 1 °C.

3. Resultados e discussões

3.1 Caracterização das matérias-primas

O cimento Portland utilizado apresentou área superficial específica igual a 0,93 m²/g e massa específica igual a 3,11 kg/dm³. A

Figura 2 - Correlação entre a condutividade elétrica (a 25°C) e a concentração de íons cloretos, obtida experimentalmente

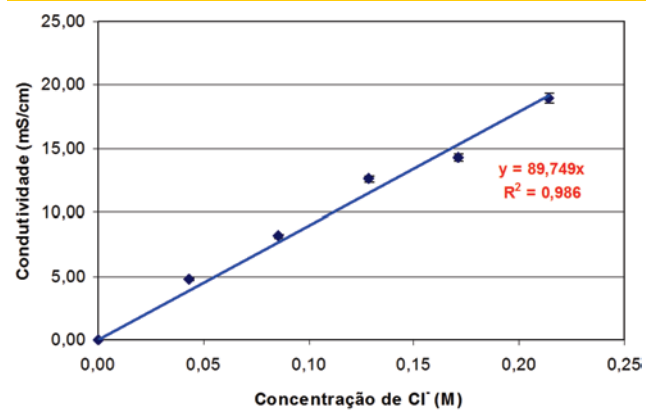


Tabela 1 – Composição Química da lama vermelha, estimada por fluorescência de raios-X (FRX)

Componente	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	CaO	SiO ₂	K ₂ O	MnO	TiO ₂	Outros	PF ^a
Teor (p %)	19,87	19,85	7,35	4,61	14,34	1,87	0,21	2,66	1,01	27,20

^aPF = perda ao fogo

areia apresentou área superficial específica igual a 0,68 m²/g e massa específica igual a 2,70 Kg/dm³ e de acordo com a norma NBR 7211, é classificada como areia fina. A brita teve massa específica igual a 2,74 Kg/dm³ e Dimensão Máxima Característica igual a 19 mm.

A lama vermelha foi recebida como uma pasta, contendo cerca de 40% de água livre. No presente estudo, o material foi seco, trituraado e moído sendo, então, usado como um aditivo em pó. Após a confirmação das vantagens do uso da lama vermelha, recomenda-se aproveitar a água presente na lama “in natura” como parte da água de mistura.

A área superficial da lama vermelha seca é igual a 20,27 m²/g, a massa específica é igual a 2,90 kg/dm³ e o pH bastante elevado (12,95), acima dos limite da NBR 10004, o que classifica a lama vermelha como um resíduo perigoso.

A Tabela 1 apresenta a composição química da lama vermelha, enquanto a Figura 3 mostra o spectrum de difração. Como era esperado, o hidróxido de alumínio (Al(OH)₃), o carbonato de cálcio (CaCO₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃) são os componentes dominantes, mas as quantidades relativas do SiO₂ da muscovita e do FeO(OH) são também relevantes. Alguns destes óxidos também foram detectados por DRX, que também identificou o hidróxido de alumínio e uma fase complexa Na₅Al₃CSi₃O₁₅.

3.2 Ensaio de migração de cloretos

A Figura 4 mostra a evolução da concentração de cloretos na câmara anódica durante os ensaios de migração. Foram utilizadas quatro amostras para cada teor de adição e os resultados apresentados

Figura 3 – Espectro de difração de raios-X (DRX) da lama vermelha seca

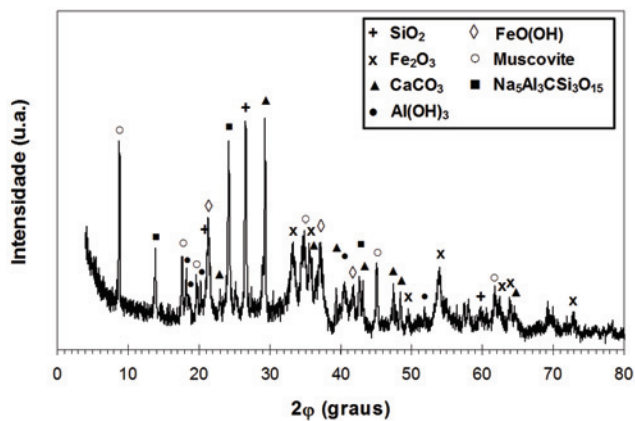


Figura 4 – Evolução da concentração de cloreto na solução presente na célula anódica em função do tempo, para ensaios de migração de cloretos (Δ = início do estado estacionário e ○ = final do estado estacionário) em amostras de concreto contendo a adição de lama vermelha

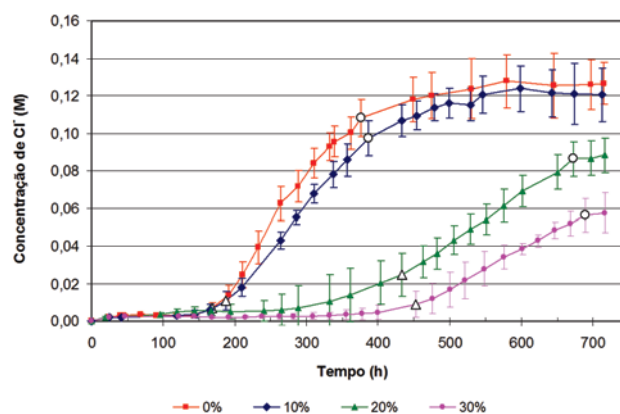


Figura 5 – Esquema do gráfico padrão obtido no ensaio de migração de cloretos, bem como a determinação gráfica do time lag (τ) e; início (Δ) e fim (○) do estado estacionário de difusão

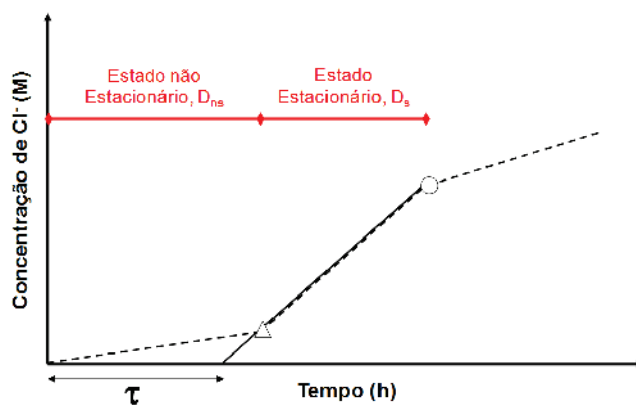
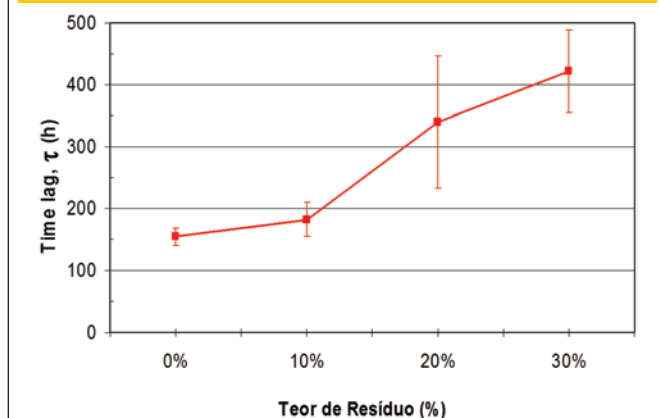


Figura 6 – Valores de “time lag” (τ), estimados a partir de ensaios de migração de cloretos, em função do teor de lama vermelha adicionado ao concreto



representam a média dos valores obtidos, com seus respectivos desvios padrões. A concentração de íons cloreto (Cl^-) aumenta com o tempo, uma vez que a tensão elétrica é aplicada, forçando estes íons a migrarem em direção ao pólo positivo do sistema.

Inicialmente, há um período em que a quantidade de cloretos que passa para a câmara anódica é desprezível. A sua duração corresponde ao chamado “time lag” (t), e pode ser definido como o tempo necessário para que os íons cloreto passem através da amostra de concreto, causando a sua saturação. Este período de tempo será usado a seguir para estimar os valores de coeficiente de difusão no estado não estacionário, D_{ns} . Após este período, o fluxo de íons cloreto através da amostra torna-se constante e corresponde ao período de estado estacionário.

O “time lag” é empiricamente obtido a partir da interseção entre o prolongamento da linha que caracteriza o estado estacionário e o eixo das abscissas (tempo), de acordo com a Figura 5.

Como pode ser visto na Figura 6, o “time lag” aumenta com o aumento da adição de lama vermelha, sendo uma provável consequência da redução da quantidade relativa de poros capilares [19]. Além disso, as partículas de lama vermelha podem fechar ou interromper a conectividade entre alguns dos poros, diminuindo assim a sucção capilar do concreto e, então, impedir o transporte de substâncias [20]. Isso acontece mesmo em amostras que apresentaram maior porosidade total, o que significa que, dentro de certos limites, este parâmetro não é tão relevante.

Após o “time lag”, o fluxo de íons cloreto através da amostra aumenta a uma taxa constante, correspondendo ao regime de estado estacionário [16]. A estimativa do coeficiente de difusão no estado estacionário (D_s) a partir dos testes de migração é feita pelo uso da equação de Nernst–Planck modificada:

$$D_s = \frac{J_{Cl} RTl}{zFC_{Cl} \gamma \Delta \Phi} \quad (1)$$

Sendo: D_s = coeficiente de difusão no estado estacionário (cm^2/s); J_{Cl} = fluxo de íons ($\text{mol}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$); R = constante de gases ($1,9872 \text{ cal}/(\text{mol} \cdot \text{K})$); T = temperatura (K); l = espessura do corpo de prova (cm); z = valência dos íons (para cloretos = 1); F = constante de Faraday ($23063 \text{ cal}/(\text{volt} \cdot \text{eq})$); C_{Cl} = concentração de íons cloretos na célula catódica (mol/cm^3); g = coeficiente de atividade da solução da célula catódica (0,657 para o Cl^-); $\Delta \Phi$ = média da tensão que efetivamente atravessa o corpo de prova durante o estado estacionário (V).

O fluxo de íons cloreto (J_{Cl}) representa a velocidade na qual os íons são transportados através do concreto e, então, os coeficientes de difusão no estado estacionário e não-estacionário podem ser calculados. O fluxo de íons cloreto pode ser obtido usando a inclinação linear do gráfico entre o início e o fim do estado estacionário de difusão e que representa a evolução da concentração de cloretos na célula anódica em função do tempo (ver Figura 5).

$$J_{Cl} = \frac{V}{A} \cdot \frac{dC}{dt}$$

Sendo: A = área da seção do corpo de prova exposta (cm^2); V = volume da célula catódica, com cloretos (cm^3); dC/dt = inclinação da reta referente ao estado estacionário, no gráfico de concentração de cloretos versus tempo.

Para calcular o coeficiente de difusão no estado não-estacionário (D_{ns}) a partir de ensaios de migração, faz-se necessário converter os resultados obtidos a valores equivalentes aos obtidos em ensaios de difusão natural. O tempo que os íons cloretos teriam levado para atingir, durante o ensaio de difusão natural, a mesma profundidade alcançada durante o ensaio de migração acelerada, t_{dif} , pode ser calculado pelas equações (B) e (C), proposta por CASTELLOTE et al. [16].

$$\frac{1}{t_{dif}} = \frac{6}{\tau v^2} \cdot \left[v \cdot \coth \frac{v}{2} - 2 \right] \quad (2)$$

Figura 7 – Fluxo de íons cloreto (J_{Cl}), estimado a partir de ensaios de migração de cloretos, em função do teor de lama vermelha adicionado ao concreto

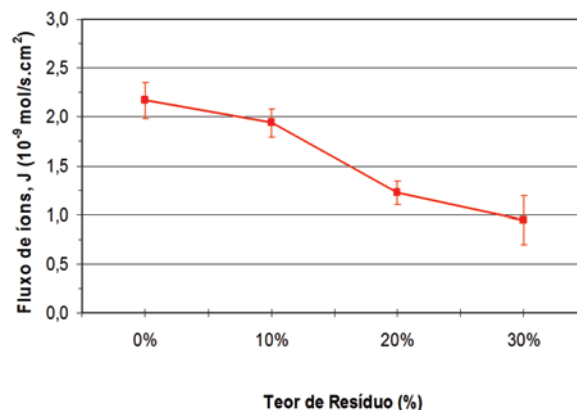
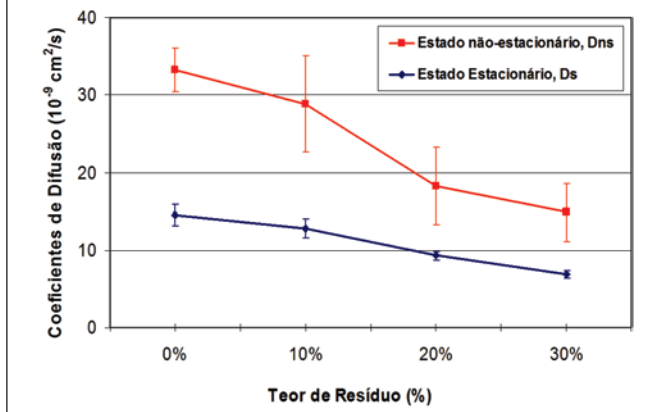


Figura 8 – Coeficientes de difusão nos estados estacionário (D_s) e não estacionário (D_{ns}), calculados a partir de ensaios de migração de cloretos, em função do teor de lama vermelha adicionado ao concreto



$$v = \frac{ze\Delta\Phi}{kT} \tag{3}$$

Sendo: t_{dif} = tempo equivalente na difusão (s); t = "time-lag" do ensaio de migração (s); k = constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K); e = carga do elétron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C).

Assim, calcula-se o coeficiente de difusão do estado não estacionário, D_{ns} , a partir da equação (D).

$$D_{ns} = \frac{l^2}{3t_{dif}} \tag{4}$$

Sendo: l = espessura do corpo de prova (cm).

A Figura 7 mostra os valores obtidos para o fluxo de íons cloreto (J_{cl}) através do concreto em função do tempo e do teor de lama vermelha. Este parâmetro representa a velocidade na qual os íons são transportados através do concreto e, então, os coeficientes de difusão no estado estacionário e não-estacionário (Figura 8) podem ser calculados. Uma clara diminuição no fluxo de íons é observada para as amostras contendo quantidades crescentes de resíduo. Esta indicação é muito positiva, pois revela um atraso no início do processo de corrosão causada pela migração de íons cloreto. Estas observações estão de acordo com as feitas por SANTOS [18] e AÏTCIN [21], que mostraram a tendência de materiais cimentícios suplementares (como a lama vermelha) reduzirem significativamente a mobilidade dos íons cloreto, refletindo o efeito do aumento da tortuosidade e da melhor distribuição dos diâmetros dos poros, provocados pelas reações pozolânicas, que dificultam a movimentação iônica. Além disso, a lama vermelha contém fases mineralógicas, como aluminossilicatos de sódio, conhecidos como "sodalites", compostos tipo zeólitos com uma capacidade de troca de íons extremamente elevada, o que torna a lama vermelha um bom absorvente

de metais pesados [22] e influencia em suas propriedades superficiais [23], entre elas uma facilidade de formação de compostos pela reação com os íons cloreto. Outros autores [24] também citam a importância da presença de aluminatos, que têm um relevante papel na fixação de íons cloretos, fazendo com que estes não estejam livres e disponíveis para iniciar o processo de corrosão. Estes aspectos discutidos no parágrafo anterior são refletidos também nos resultados dos coeficientes de difusão nos estados estacionário e não estacionário, apresentados na Figura 8, onde ambos mostram-se decrescentes em função de um maior teor de lama vermelha adicionado.

Alguns autores [16, 18, 25] justificaram a redução dos coeficientes de difusão devido a uma redução na relação água/aglomerante (neste caso, cimento + lama vermelha). No entanto, eles observaram uma redução na porosidade total em função da diminuição desta relação, o que não aconteceu no presente estudo. Logo, não é possível associar uma diminuição da relação água/aglomerante com os resultados obtidos.

Na tentativa de ter representações mais sensíveis quanto aos benefícios do uso da lama vermelha ao concreto, tentou-se relacionar os resultados de penetração de cloretos obtidos com o tempo de vida útil deste material. Para tal, foi utilizada a segunda Lei da Difusão de Fick (equações E e F), de acordo com o proposto por estudos recentes [24, 26].

$$PC = 2(z)\sqrt{D_s \cdot t} \tag{5}$$

$$erf(z) = 1 - \frac{C_{cl} - C_o}{C_s - C_o} \tag{6}$$

Figura 9 – Relação entre o tempo de vida útil e a penetração de cloretos (espessura em que a concentração de cloretos atinge 0,4%)

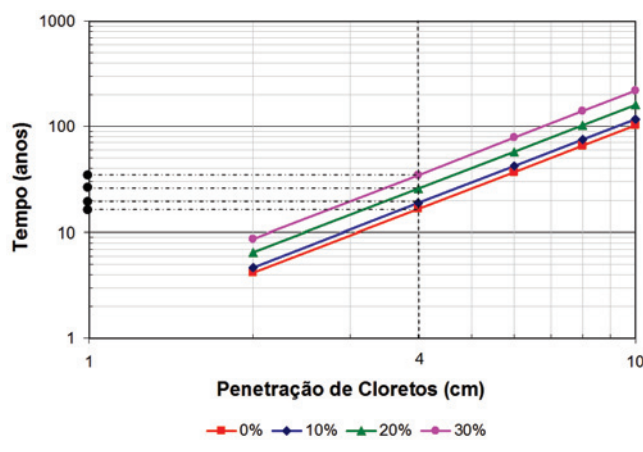
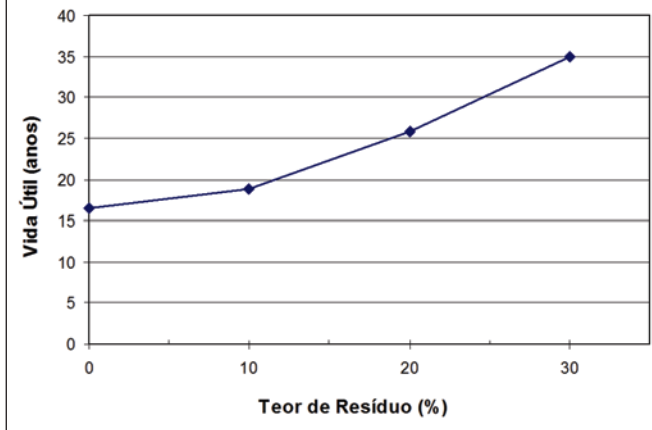


Figura 10 – Relação entre o tempo de vida útil e o teor de resíduo adicionado, estimado em função do ensaio de migração de cloretos



onde D_s é o coeficiente de difusão no estado estacionário (cm^2/ano); t é o tempo de vida útil (anos), $\text{erf}(z)$ é a função Gaussiana de erros, PC (penetração de cloretos) é a profundidade em que a concentração de cloretos atinge o limite para que ocorra a despassivação da armadura (cm), C_o é a concentração inicial de cloretos (neste caso, 0%), C_s é a concentração de cloretos na superfície (%) e C_{cl} é a concentração de cloreto em função da profundidade e do tempo (%), em relação à massa de cimento.

Orientando-se pela literatura [26, 27], foram fixados alguns parâmetros: $C_s = 1,8\%$ e $C_{cl} = C_{dep} = 0,4\%$ em peso de cimento, onde C_{dep} é a concentração limite de cloreto para despassivar o aço (por peso de cimento). Os resultados obtidos são apresentados na Figura 9, onde são destacados os valores de vida útil para a penetração de cloretos em estruturas com um revestimento de concreto igual a 4 cm (valor mínimo exigido pelas normas, para ambientes agressivos, com presença de cloretos). Estes valores são mais bem visualizados na Figura 10.

As amostras de referência (sem resíduo) apresentaram 16,5 anos de vida útil e a adição de lama vermelha aumentou a estimativa de vida útil do concreto para até 35 anos (duas vezes maior do que a referência), em amostras de concreto contendo 30% de adição da lama vermelha.

4. Conclusões

Após a análise dos resultados apresentados, pode-se concluir que:

- O “time lag” aumenta com o aumento da adição de lama vermelha, sendo uma provável consequência da redução da quantidade relativa de poros capilares;
- A diminuição no nível de interconectividade entre os poros capilares nas amostras contendo lama vermelha e a presença de fases mineralógicas típicas, como aluminossilicatos de sódio, conhecidos como “sodalites” são responsáveis pela redução do fluxo de íons e, conseqüentemente, dos coeficientes de difusão nos estados estacionário e não estacionário;

- Amostras de concreto contendo lama vermelha apresentaram, segundo resultados de migração de cloretos, uma maior vida útil, atingindo um valor superior ao dobro do obtido para as amostras de referência (16,5 contra 35 anos).

5. Agradecimentos

FAPESB — Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia. PPGCEM / UFSCar — Programa de Pós Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos. UA/DECV – Universidade de Aveiro / Departamento de Cerâmica e Vidro – Projeto FCT-PTDC/CTM/65243/2006.

* Este projeto não teve suporte financeiro da ALCOA do Brasil.

6. Referências

- [01] ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2009. Abrelpe, 2009. 210 p.
- [02] IBRAM – Brazilian Mining Association. Bauxita. Available in: <www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00000033.pdf>. Accessed in oct., 15th, 2010.
- [03] ROSKILL REPORTS. The Economics of Bauxite & Alumina. Available in: <www.roskill.co.uk/index.html>. Accessed in nov., 20th, 2010.
- [04] SINGH, M.; UPADHAYAY, S.N.; PRASAD, P.M. Preparation of special cements from red mud. Waste Management, v. 16, n. 8, p. 665-670, 1996.
- [05] GLASSER, F.P. Fundamental aspects of cement solidification and stabilization. Journal of Hazardous Material, v. 52: p. 151-170, 1997.
- [06] AMRITPHALE, S.S. et al. A novel process for making radiopaque materials using bauxite—Red mud. Journal of the European Ceramic Society. v. 27, n. 4, p. 1945-1951, 2007.
- [07] AMRITPHALE, S.S.; PATEL, M. Utilisation of red mud, fly ash for manufacturing bricks with pyrophyllite. Silicates Ind, v. 2, n. 3, p. 31-35, 1987.
- [08] VINCENZO, M.S.; RENZ, C.; STEFANO, M.; GIOVANNI, C. Bauxite red mud in the ceramic industry. Part 2: production of clay based ceramics. Journal of the European Ceramic, v. 20, n. 3, p. 245–252, 2000.
- [09] YALCIN, N.; SEVNIC, V. Utilization of bauxite waste in ceramic glazes. Ceramics International, v. 26, n. 5, p. 485-493, 2000.
- [10] ASOKAN, P.; SAXEAN, M.; ASOLEKAR, S.R. Coal combustion residues-environmental implications and recycling potentials. Resources, Conservation and Recycling, v. 43, n. 3, p. 239-262, 2005.
- [11] TSAKIRIDIS, P.E.; AGATZINI-LEONARDOU, S.; OUSTADAKIS, P. Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker. Journal of Hazardous Material, v. 116, n. 1-2, p. 103-110, 2004.
- [12] SINGH, M.; UPADHAYAY, S.N.; PRASAD, P.M. Preparation of iron rich cement from red mud. Cement and Concrete Research, v. 27, n. 7, p. 1037-1046, 1997.
- [13] CABEZA, et al. Red mud as a corrosion inhibitor for reinforced concrete. The Journal of Corrosion Science and Engineering, v. 6, n. 32, p. 1-4, 2003.

- [14] GORDON, J.N.; PINNOCK, W.R.; MOORE, M.M. A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud Composites. *Cement and Concrete Composites*, v. 18, n. 6, p. 371-379, 1996.
- [15] ANDRADE, C. Calculation of diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements. *Cement and Concrete Research*, v.23, n. 3, p. 724-742, 1993.
- [16] CASTELLOTE, M.; ANDRADE, C.; ALONSO, C. Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests. *Cement and Concrete Research*, v.31, n. 10, p. 1411–1420, 2001.
- [17] TONG, L.; GJØRV, O.E. Chloride diffusivity based on migration testing. *Cement and Concrete Research*. v.31, n. 7, p. 973-982, 2001.
- [18] SANTOS, L. Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto. 161p. Dissertação (Mestrado em estruturas), Departamento de Estruturas, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.
- [19] RIBEIRO, D.V.; LABRINCHA, J.A.; MORELLI, M.R. Use of Red Mud as Addition for Portland Cement Mortars. *Journal of Materials Science and Engineering*, v. 4, n. 8, p. 1-9, 2010.
- [20] SONG, G. Equivalent circuit model for SAC electrochemical impedance spectroscopy of concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n.11, p. 1723-1730, 2000.
- [21] AÏTCIN, P.C. The durability characteristics of high performance concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 4-5, p. 409-420, 2003.
- [22] CHVEDOV, D.; OSTAP, S.; LE, T. Surface properties of red mud particles from potentiometric titration. *Colloids Surface A*, v. 182, n. 1, p. 131-141, 2001.
- [23] LOPEZ, E.; SOTO, B.; ARIAS, M. Adsorbent properties of red mud and its use for wastewater treatment. *Water Research*, v. 32, n. 4, p. 1314-1322, 1998.
- [24] YADAV, V.S.; et al. Sequestration of carbon dioxide (CO₂) using red mud. *Journal of Hazardous Materials*, v. 176, n. 1-3, p. 1044–1050, 2010.
- [25] AMPADU, K.O.; TORII, K.; KAWAMURA M. Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste. *Cement and Concrete Research*, v. 29, n. 4, p. 585-590, 1999.
- [26] MEDEIROS, M.H.F.; HELENE, P. Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Construction and Building Materials*, v. 23, n. 3, p. 1476–1484, 2009.
- [27] NILSSON, L.; ANDERSEN, A.; LUPING, T.; UTGENANNT, P. Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment. In: SECOND INTERNATIONAL RILEM WORKSHOP ON TESTING AND MODELLING THE CHLORIDE INGRESS INTO CONCRETE, 2000, Paris. *Anais...* Paris: 2000, 12p.