

Estudo da influência de cal hidratada na permeabilidade do concreto

Study of the influence of hydrated lime on the permeability of concrete

Fabiana Ferreira da Silva ^{†*}, Gizele Ferreira da Silva Fiuza [†], Laura Heleonora Silva de Souza Bandeira Neves [†], Gustavo José da Costa Gomes [‡]

Resumo

O emprego de teores de cal hidratada em materiais cimentícios promove alterações demandadas quanto ao seu uso em ambientes críticos. As adições dispostas visam intervir no consumo de hidróxido de cálcio oriundo da hidratação, que ocasiona a diminuição deste composto, levando a um estado superior de facilidade de entrada de íons corrosivos, promovendo desgaste da armadura, uma vez o pH diminuído devido a isto. Foram utilizados para análise, corpos-de-prova com aglomerantes com teores de 100 % de cimento Portland, outros com 20 % de adição de cal hidratada e os demais com 50 % de adição do referido composto. Todos os teores possuem corpos-de-prova variando com o fator água/aglomerantes em 0,4; 0,5 e 0,6, com o intuito de investigar a contribuição da adição da cal hidratada na permeabilidade do concreto elaborado, em teste de permeabilidade e também seu aporte quanto às características físicas dos corpos-de-prova em ensaio de compressão mecânica. Observou-se que as massas elaboradas com a cal hidratada possuíam um menor índice de vazios, oriundo da evaporação da água, influenciando na permeabilidade da pasta, que contribui significativamente na permissividade de agentes agressivos.

Palavras-Chave: Cal, Concreto, Permeabilidade.

Como citar esse artigo. da Silva, FF; Fiuza, GFS; Neves, LHSB; Gomes, GJC. Estudo da influência de cal hidratada na permeabilidade do concreto. Revista Teccen. 2018 Jan./Jun.; 11 (1): 02-09.

Abstract

The use of hydrated lime contents in cementitious materials promotes changes in its use in critical environments. The additions are intended to interfere in the consumption of calcium hydroxide from the hydration, which causes the reduction of this compound, leading to a superior state of ease of entry of corrosive ions, promoting wear of the reinforcement once the pH is decreased due to this. Batch test specimens with 100 % Portland cement, 20 % hydrated lime addition, and 50 % addition of said compound were used for the analysis. All contents have specimens varying with the water / binder factor by 0.4; 0.5 and 0.6, in order to investigate the contribution of the addition of hydrated lime to the permeability of the prepared concrete in the permeability test and also its contribution to the physical characteristics of the test specimens in the mechanical compression test. It was observed that the masses made with hydrated lime had a lower voids index, due to the evaporation of the water, influencing the permeability of the pulp, which contributes significantly to the permissiveness of aggressive agents.

Keywords: Lime, Concrete, Permeability.

Introdução

Segundo Mehta e Monteiro (2008), “O concreto é um material poroso, devido à impossibilidade de preenchimento total dos vazios formados entre os agregados e a pasta de cimento.” A deterioração do concreto, assim como a corrosão de suas armaduras está ligada a estruturas dos poros. Quando a quantidade de poros é aumentada, a resistência do concreto é reduzida quando submetida a ações químicas e físicas.

O fator água/aglomerante permite estabelecer o nível de trabalhabilidade do concreto, porém quando elevada essa quantidade, há um maior número de vazios capilares, que são diretamente proporcionais a

vulnerabilidade da resistência mecânica do mesmo.

Com a adição da cal hidratada é permitido que se obtenha um concreto com menor permeabilidade, adotando-se um fator água/aglomerante que garanta a trabalhabilidade sem prejudicar a qualidade de resistência do concreto, que assegure características mecânicas necessárias, juntamente com a diminuição da porosidade, fornecendo assim uma resistência nos padrões exigidos.

Estrutura do Concreto

Os vazios originados do uso de água na massa em quantidade superior à recomendada para a hidratação do

Afiliação dos autores: [†] Graduando em Engenharia Civil pela Universidade de Vassouras
[‡] Docente MSc. em Engenharia Civil pela Universidade de Vassouras

* Email para correspondencia: bianaferreras@gmail.com

aglomerante, ao evaporar, deixa cavidades no concreto.

Uma fina camada de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio) é formada ao redor das armaduras e das partículas de agregados originando filmes duplos de transição com espessuras da ordem de micrômetros. Nas barras da armadura os óxidos de ferro reagem com o hidróxido de cálcio formando ferrito de cálcio, sendo este parte do filme que protege o aço contra a corrosão. Os íons OH^- , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ e SO_4^{2-} são liberados pelas reações de cura (ou de hidratação) do concreto, contidos nos poros ocupados pela fase aquosa do mesmo. Os íons Na^+ (sódio) e K^+ (potássio) são os principais responsáveis pela elevação da alcalinidade do concreto. A fase líquida ou aquosa do concreto apresenta pH entre 12,5 e 13,5, favorecendo a formação da camada de óxido férrico passivante, compacta e aderente à superfície da armadura, como descreve Ribeiro (2014).

O concreto funciona como uma barreira de proteção física ao ingresso de substâncias presentes no meio externo, além de ser necessário para manter passiva a superfície do aço, pelo alto pH, protegendo o aço de corrosão.

O concreto por proporcionar baixa permeabilidade, minimiza a penetração de substâncias que podem contribuir à corrosão. Devido a isto, a corrosão do aço geralmente não ocorre na maioria dos elementos de concreto. Todavia, pode ocorrer se o concreto não apresentar a qualidade estimada, se houver erros quanto ao projeto da estrutura para o ambiente de serviço, ou caso esse ambiente se modifique, variando a vida útil desse concreto.

Fator água/Aglomerante

A relação água/aglomerante é a quantidade de água da mistura medida em relação à massa de cimento (aglomerante). Enquanto no estado fresco, a pasta (mistura de água e cimento) tem função de envolver os agregados, preencher os vazios e garantir mobilidade e fluidez à mistura. No estado endurecido, a pasta serve para aglutinar os agregados, garantindo impermeabilidade, resistência mecânica e durabilidade.

O teor da pasta tem influência nas propriedades do concreto, tais como: trabalhabilidade, permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e durabilidade.

Porosidade

Os vários tipos de vazios formados na pasta de cimento hidratada contribuem para caracterização de suas propriedades. Esse volume total dos vazios é chamado de porosidade. O volume de poros obtidos depende principalmente do fator água/cimento (a/c).

A integração entre o ambiente de exposição e as estruturas de concreto armado ocorre pela penetração

por meio de fissuras da estrutura, de agentes agressivos contidos no ambiente, tais como vapores, gases e líquidos. O grau dessa interação é determinado por parâmetros como a concentração da substância agressiva no ambiente, a forma de transporte dessa substância através da estrutura e a porosidade do concreto.

Segundo Schiessl (1987), os mecanismos de transporte de substâncias no concreto dependem da concentração dos agentes agressivos no ambiente, das características químicas do concreto relacionadas ao tipo de cimento, da microestrutura do concreto e do grau de umidade. As propriedades microestruturais do concreto associam-se à sua porosidade, e conseqüentemente a fissuras. O teor de umidade presente nos poros modera a penetração de substâncias e permite o transporte de alguns íons.

De acordo com o código FIP-CEB (Comité Euro-international du Béton) de 2010, os parâmetros de maior importância na caracterização dos poros do concreto com relação ao transporte de substância é a porosidade aberta e a distribuição dos diâmetros dos poros. O referido código caracteriza porosidade aberta como conjunto de poros interconectados por meio dos quais o transporte de líquidos ou gases e/ou a troca de substâncias dissolvidas é possível.

O código FIP-CEB de 2010 ainda classifica os poros de acordo com suas características e origem como: poros de ar aprisionado (decorrente dos processos de adensamento do concreto), poros de ar incorporado (obtidos quando do emprego de aditivos incorporadores de ar), poros capilares (oriundos da saída de água livre do concreto) e poros do gel (devido à água de gel). Os macroporos e os poros capilares são os que possuem maior relevância para a durabilidade e conseqüentemente para acesso de ataques degradantes.

Os macroporos geralmente são poros com dimensões superiores a 1000 Å, decorrentes de problemas de adensamento (ar aprisionado) e do uso de incorporadores de ar (ar incorporado). Os poros capilares são gerados pela evaporação da água livre do concreto e possuem dimensões que variam entre 100 Å e 1000 Å em função da relação água/cimento ou do grau de hidratação. Os poros do gel, por sua vez, apresentam dimensões inferiores a 100 Å e dependem do grau de cristalização dos produtos da hidratação, especificamente, do C-S-H (KIHARA & CENTURIONE, 2005).

Adicionalmente, a zona de transição (zona ao redor dos agregados com maior porosidade, onde cristais de grandes dimensões são formados) pode contribuir para aumentar a capacidade de transporte no interior do concreto, principalmente quando se aumenta a fração de agregados, o que pode facilitar a interconexão entre as diversas zonas de transição (NEPOMUCENO, 2005).

A porosidade, característica relacionada à quantidade de orifícios estreitos (poros) e a permeabilidade, capacidade do concreto em deixar

passar fluidos através de seus poros, aumentam ao passo que o fator água/aglomerante também é aumentado. Isto também influencia na durabilidade, uma vez o concreto exposto a ambientes agressivos, o fator água/aglomerante estando diretamente ligado ao índice de vazios, contribui para uma menor penetração dos agentes externos, ou seja, quanto menor a relação entre a água e o cimento, mais duráveis são as estruturas. A Figura 1, a seguir, apresenta um gráfico da porosidade em relação à resistência à compressão.

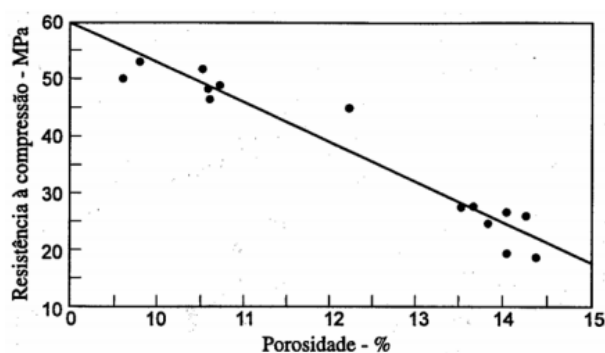


Figura 1. Relação entre a resistência à compressão e a porosidade Fonte: Petrucci (1978).

Projeto Experimental

Confecção dos corpos de prova

Com o objetivo de averiguar a influencia da adição de cal hidratada em estruturas de concreto, o programa experimental consistiu na elaboração de corpos de prova para análises de resistência mecânica, permeabilidade de soluções e ensaio de capilaridade para detectar o comportamento dos constituintes da mistura de concreto com diferentes proporções.

Traço do concreto dos corpos-de-prova

Com o propósito do projeto experimental, foram elaborados traços com diferentes proporções conforme a Tabela 1 indica. Caldas Branco (1974), em sua tabela de traços elaborados, informa a proporção de 1:2:3 como a relação dos constituintes que determina o fck de 25 MPa.

No projeto experimental, o uso de britas foi dispensado (agregado graúdo), uma vez que a presença destas no concreto não propicia uma uniformidade da difusão de soluções, podendo acarretar descontinuidades, devido acúmulo de solução em diferentes regiões

da estrutura, provocadas pelas irregularidades dos agregados graúdos, levando a um estado de diferente situação no mesmo corpo-de-prova.

Variação do fator água/aglomerante foi disposta para verificar a influência da cal na mistura, uma vez que a resistência da pasta (mistura de água e aglomerante) é um dos principais fatores que influencia na resistência à compressão do concreto. Quando se aumenta o fator água/aglomerante, a resistência diminui, segundo a lei de Abrams.

Corpos de prova para ensaio de resistência mecânica à compressão

O procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto para o ensaio resistência mecânica à compressão, seguiu-se de acordo com a NBR 5738:2015. Foram confeccionados 36 corpos-de-prova cilíndricos (Figura 2), sendo 4 corpos-de-prova para cada traço, conforme a Tabela 1 (tabela de traço) adotando-se as dimensões básicas de 10 cm de diâmetro, e 20 cm de altura, conforme estabelece o item 4.1.1.1 da NBR 5738:2015, onde se estabelece a proporção que a altura deva possuir o dobro da dimensão do diâmetro da base do corpo de prova cilíndrico. Conforme o item 7.4.2 da NBR 5738:2015, o adensamento foi manual respeitando o número de camadas e golpes estabelecidos no referido item. Após a confecção, os corpos-de-prova foram colocados sobre uma superfície horizontal compacta sem quaisquer interferências externa e armazenados em local isento de intempéries, em um período de 28 dias devidamente identificados. Com sete dias foi realizada a remoção das formas dos corpos-de-prova.

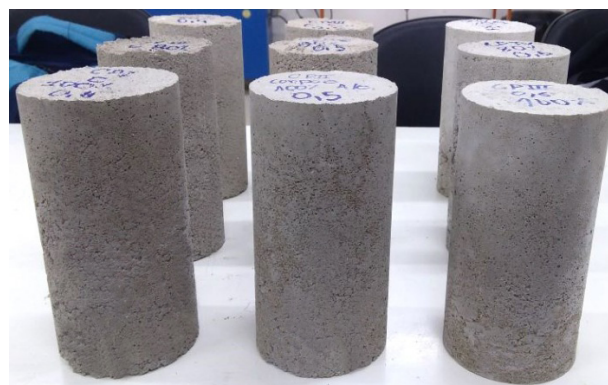


Figura 2. Lote de corpos-de-prova cilíndricos com os traços elaborados (Fonte: os autores).

Tabela 1. Traços Elaborados para os corpos-de-prova

Traço	Cimento (kg)	C a l (kg)	Areia (kg)	Água (l)	Fator água/aglomerante
1	1,0	0,0	2,1	0,4	0,4
2	1,0	0,0	2,1	0,5	0,5
3	1,0	0,0	2,1	0,6	0,6
4	0,8	0,2	2,1	0,4	0,4
5	0,8	0,2	2,1	0,5	0,5
6	0,8	0,2	2,1	0,6	0,6
7	0,5	0,5	2,1	0,4	0,4
8	0,5	0,5	2,1	0,5	0,5
9	0,5	0,5	2,1	0,6	0,6

Fonte: os autores

Corpos de prova para ensaio de avaliação da permeabilidade por absorção de água por imersão

O procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto para o ensaio de permeabilidade de soluções, onde se investiga por meio de absorção de água, seguiu-se de acordo com a NBR 9778:1987. Foram confeccionados 36 corpos-de-prova cilíndricos (Figura 3), sendo 4 corpos-de-prova para cada traço, conforme a Tabela 1 (tabela de traço). As dimensões adotadas foram de 10 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Os corpos-de-prova seguiram os parâmetros de moldagem e cura conforme estabelecidos na NBR 5738:2015. Para uniformizar as superfícies dos corpos-de-prova e igualar a capacidade de permeabilidade, todas as faces foram lixadas. O procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova de concreto para o ensaio de absorção de água por capilaridade, seguiu-se de acordo com a NBR 9779:1995.



Figura 3. Lote de corpos-de-prova para ensaio de permeabilidade com os traços elaborados. (Fonte: os autores).

Ensaio de resistência mecânica à compressão

O ensaio de resistência à compressão seguiu os itens preconizados na NBR 5739:2007. O ensaio teve carregamento de 0,45 MPa/s, mantida esta velocidade constante durante todo o ensaio, conforme a figura 4.



Figura 4. Ensaio de Resistência mecânica à compressão (Fonte: os autores).

Ensaio de avaliação da permeabilidade por absorção de água por imersão

Para a realização dos testes de permeabilidade, absorção e capilaridade de água, foram utilizados: uma balança de precisão, tanque para banho de frascos Lê Chatelier (figura 5) e água para imergir os corpos-de-prova.

Aferida as massas das amostras em uma balança de precisão em condições normais de temperatura e umidade, estas foram mantidas em estufas a temperatura média de 105°. Determinada assim a massa da amostra posterior a permanência na estufa de 24h, 48h e 72h, a fim de verificar a completa secagem das amostras.

Contemplada a secagem em estufa e determinada às massas, os corpos-de-prova foram imersos em água à temperatura de 25°C, durante o período de 72 horas (Figura 6). Durante o ensaio foram determinadas a massa dos corpos nos intervalos de 3, 6, 24, 48 e 72 h, conforme estabelecido nas NBR 9778:1987 e NBR 9779:1995, contando a partir da colocação destes em contato com a água. Enxugados previamente, os corpos-de-prova retornaram ao recipiente de ensaio.



Figura 5. Tanque de banho de frascos (Fonte: os autores).

Resultados

Os traços elaborados com maiores teores de cal apresentaram menores resistências à compressão, comparados aos traços sem cal (Tabela 2), devido ao fato de apresentarem menores teores de cimento, o que provoca menores formações de silicato bicálcico e silicato tricálcico, que são contribuintes da resistência mecânica.

Segundo SILVA (2006), o aumento do consumo de água também é responsável pela diminuição das resistências mecânicas das argamassas. A Lei de Jurin associa a altura da penetração da água nos capilares ao inverso dos raios dos capilares, ou seja, quanto menor os raios capilares, maior a ascensão da água nos corpos de prova (SILVA, 2006). As figuras 7 e 8 mostram que comparativamente, o corpo-de-prova sem adição de

cal em corte apresenta maior difusão de água do que o corpo-de-prova com adição de cal, para o mesmo fator água/aglomerante.

As misturas elaboradas com cal apresentam coeficientes de capilaridades maiores, uma vez a formação de raios capilares menores, o que impacta diretamente na permeabilidade da estrutura. A tabela 3 mostra as medidas da penetrabilidade da água em função do tempo dos traços submersos em água a 25 °C, conforme o ensaio da permeabilidade por absorção de água por imersão.

A área superficial das partículas é expandida no comparecimento da cal na mistura, por conseguinte eleva o consumo de água. Os vazios efetivos presentes são preenchidos por partículas finas, conduzindo a água, que atua como facilitadora do deslizamento das partículas, permitindo um melhor encaixe e mobilidade das mesmas. A exigência de maior quantidade de água em misturas com a presença de cal se deve ao fato de que uma parcela da água beneficiou o processo de hidratação do cimento e outra parcela beneficiou o processo de adsorção das partículas dos agregados. As argamassas com cal apresentaram densidade de massa menor que as argamassas sem cal.

A Figura 9 mostra o índice de vazios formados com o aumento da relação água/aglomerante. A Figura 10 demonstra que o aumento do teor de cal diminui a porosidade, porém na Figura 11 observa-se o excesso de cal na mistura, o que provoca diminuição da resistência à compressão. Sendo assim, o aumento do fator água/aglomerante aumenta significativamente o índice de vazios e, a adição de cal apresenta menor porosidade.

Tabela 2. Média do Fator de Compressão Característico.

Traço	Cimento (kg)	Cal (kg)	Areia (kg)	Água (l)	Fator água/aglomerante	Fck (MPa)
1	1,0	0,0	2,1	0,4	0,4	28,1
2	1,0	0,0	2,1	0,5	0,5	26,8
3	1,0	0,0	2,1	0,6	0,6	22,2
4	0,8	0,2	2,1	0,4	0,4	24,5
5	0,8	0,2	2,1	0,5	0,5	23,4
6	0,8	0,2	2,1	0,6	0,6	21,8
7	0,5	0,5	2,1	0,4	0,4	18,3
8	0,5	0,5	2,1	0,5	0,5	17,3
9	0,5	0,5	2,1	0,6	0,6	16,8



Figura 7. Corte de corpo-de-prova sem adição de cal em estado úmido no interior, após imersão em água (Fonte: os autores).



Figura 8. Corte de corpo de prova com adição de cal em estado seco no interior, após imersão em água (Fonte: os autores).

Tabela 3. Média da Absorção de água (Fonte: os autores).

Traço	Cimento (kg)	Cal (kg)	Fator água/aglomerante	Massa (kg) 3 horas	Massa (kg) 6 horas	Massa (kg) 24 horas	Massa (kg) 42 horas	Massa (kg) 72 horas	% massa de água penetrada
1	1,0	0,0	0,4	0,783	0,805	0,833	0,879	0,911	16,3
2	1,0	0,0	0,5	0,772	0,794	0,852	0,902	0,921	19,3
3	1,0	0,0	0,6	0,711	0,792	0,841	0,922	0,949	33,4
4	0,8	0,2	0,4	0,706	0,760	0,799	0,814	0,822	16,4
5	0,8	0,2	0,5	0,668	0,705	0,732	0,755	0,784	17,3
6	0,8	0,2	0,6	0,657	0,711	0,726	0,766	0,771	17,3
7	0,5	0,5	0,4	0,671	0,713	0,729	0,735	0,743	10,7
8	0,5	0,5	0,5	0,585	0,612	0,637	0,652	0,664	13,5
9	0,5	0,5	0,6	0,525	0,573	0,594	0,603	0,612	16,5



Figura 9. Microscopia dos corpos de prova com 100 % de cimento como aglomerante com fator água aglomerante 0,4 (acima) e 0,6 (abaixo) (Fonte: os autores).



Figura 10. Microscopia dos corpos de prova com aglomerante composto de 80 % cimento e 20 % cal com fator água aglomerante 0,4 (acima) e 0,6 (abaixo) (Fonte: os autores).



Figura 11. Microscopia dos corpos de prova com aglomerante composto de 50 % cimento e 50 % cal com fator água aglomerante 0,4 (acima) e 0,6 (abaixo) (Fonte: os autores).

Conclusão

O uso de cal pode comprometer a resistência das estruturas, porém, quando utilizados constituintes de proporção geométrica adequada este fator pode ser otimizado. Ao diminuir a quantidade de água da mistura, a trabalhabilidade diminui de forma simultânea, todavia a resistência aumenta conforme a Lei de Abrams. A intenção na adição de cal na mistura torna possível uma trabalhabilidade satisfatória, sem a necessidade da diminuição na proporção água/aglomerante escapando de um estado de porosidade elevado que a proporção

de água elevada levaria. Assim, sendo possível uma mistura capaz de possuir uma boa trabalhabilidade e menos porosidade, com isto menor probabilidade de ataques agressivos.

Outro aspecto relevante é a densidade da massa no estado endurecido que é resolutivo na absorção de água devido ao acondicionamento das partículas presentes que aperfeiçoa as propriedades gerais da mistura.

Referências

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778, (1987). Argamassa

e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica, São Paulo.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9779, (1995). Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade, São Paulo.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739. (2007). Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, São Paulo.

Branco, A. A. C. (1974). Tabela de traços. Rio de Janeiro.

Comité Euro-International du Béton CEB-FIP model code 1990: (2010). Design code. CEB Bulletin d'Information.

Kihara, Y., Centurione, S. L.(2005). O cimento Portland. In. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. Ed. G.C. Isaia. São Paulo: IBRACON, v.1. p. 295-322.

Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M. (2008). Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon.

Nepomuceno, A. A. (2005) Mecanismos de transporte de fluidos no concreto.

Petrucci, Eladio G. R. (1978). Materiais de Construção. [S.l.]: Globo, 436 p.

Schiessl P. (1987), Influence of the composition of concrete on the corrosion protection of the reinforcement, Proceedings American Concrete Institute, Detroit MI (USA), pp1634-1650.

Silva, N. G. (2006). Argamassas de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária. Curitiba, 164 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.