

ATAQUE DO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO POR ÁGUAS PURAS

Marcello Jorge (1); Flávio Mamede(2); Helena Carasek (3); Oswaldo Cascudo(4)

(1) *Eng. Civil, mestre em engenharia pela Universidade Federal de Goiás*
email: marcellojorge@bol.com.br
endereço: Al. Das quaresmeiras, qd11 lt28 jardins Florença.
Cep 74351008. Fone (62) 246-3287

(2) *Eng. Civil, pesquisador do Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A.*
email: wally@furnas.com.br

(3) *Eng. Civil, professora doutora da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.*
email: hcarasek@cultura.com.br

(4) *Eng. Civil, professor doutor da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás.*
email: ocascudo@cultura.com.br

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo verificar, através de um programa experimental desenvolvido no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A. (em Goiânia-GO), a deterioração do concreto compactado com rolo (CCR) devida à ação de água pura. Para tanto, corpos-de-prova de CCR, dosados com 90 kg/m³ de aglomerante (com e sem substituição parcial de cimento Portland por sílica ativa), foram submetidos a um processo acelerado de lixiviação através de percolação de água deionizada durante 4 meses, utilizando o aparato empregado no ensaio de permeabilidade à água sob pressão (ABNT NBR 10786: 1989). A água lixiviada ao longo deste período foi monitorada através de análises químicas, com o intuito de verificar os principais compostos que estavam sendo removidos do concreto. Ao final do experimento, foram avaliadas as alterações na resistência à compressão e na permeabilidade, bem como as mudanças ocorridas em nível microestrutural através da técnica de microscopia eletrônica de varredura.

1 Introdução

A deterioração do concreto se dá, basicamente, por efeitos físico-mecânicos, químicos ou eletroquímicos. Dentre os processos químicos, encontra-se a deterioração causada pela lixiviação. A lixiviação pode ser definida como a ação extrativa ou de dissolução que os compostos hidratados da pasta de cimento podem sofrer quando em contato com águas, principalmente puras ou ácidas.

Uma das principais conseqüências decorrente da lixiviação é a perda de resistência, conforme observam Bereczky citado por BICZOCK (1972), Moskwin citado por BICZOK (1972), LEA (1976), SOUKATCHOF (1985) e CARDE et al. (1997), podendo chegar a valores expressivos, comprometendo assim a vida útil das estruturas de concreto, principalmente represas, barragens, tubulações e aquelas destinadas ao armazenamento de lixo nuclear. Não menos importante, também se constitui uma conseqüência da lixiviação os seus efeitos sobre a durabilidade do concreto, seja pela redução da alcalinidade, que leva à corrosão das armaduras, seja pelo aumento da porosidade, que facilita a ocorrência dos principais mecanismos de transporte que induzem à deterioração química do concreto (CASCUDO, 1997).

Com relação às barragens, existem vários relatos de deterioração do concreto pela ação de águas agressivas que informam sobre a formação de regiões de percolação, as quais podem, com o tempo, causar danos à estrutura, principalmente devidos ao aumento da porosidade do concreto e redução da resistência mecânica. Sendo assim, em muitos desses casos relatados foram necessários reparos onerosos na estrutura de forma a manter a sua integridade e, dependendo da intensidade do ataque, houve perda total da resistência mecânica, acarretando a inutilização da estrutura como ocorrido nas barragens de Avon (Austrália) e Drum Afterbay (EUA), segundo GONTIJO et al. (1995).

O objetivo deste trabalho, então, é o de apresentar parte dos resultados de uma pesquisa mais ampla (JORGE, 2001), cuja intenção geral consistiu em

estudar o mecanismo de lixiviação pela ação de águas puras, avaliando suas implicações nas alterações da microestrutura e nas propriedades do concreto compactado com rolo (CCR), com e sem a presença de sílica ativa. Para tanto, fez-se necessário o desenvolvimento de um programa experimental de laboratório.

2 Programa Experimental: Materiais e Métodos

A variável estudada no programa experimental foi o efeito da substituição de parte do cimento por sílica ativa. Foram feitos dois proporcionamentos de CCR, sendo um usando somente cimento como aglomerante, com consumo de 90 kg/m^3 , e o outro apresentando substituição de 10% do volume de cimento por sílica ativa, mantendo-se o consumo de aglomerante (cimento e sílica ativa) igual a 90 kg/m^3 . Esses dois concretos foram designados neste trabalho como 90 e 90S, respectivamente.

Para avaliar os efeitos da lixiviação, foi realizado o ensaio de percolação (Fotografia 1), que consistiu em acelerar o processo de lixiviação no concreto através da passagem da água pura sob pressão, usando o aparato empregado no ensaio de permeabilidade à água sob pressão da NBR 10786 (ABNT, 1989). Durante este ensaio, foram registrados os fluxos de água e, ao final, depois de transcorridos 125 dias de ataque, os corpos-de-prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, bem como avaliados quanto à microestrutura através de análises de amostras por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Essas avaliações foram realizadas tanto para os corpos-de-prova atacados quanto para os de referência, moldados na mesma ocasião, porém mantidos em câmara úmida (sem percolação). O início do processo de percolação deu-se com a saída dos corpos-de-prova da câmara úmida, na idade de 63 dias.



Fotografia 1 – Permeômetros usados no ensaio de permeabilidade e adaptados para o ensaio de lixiviação.

Amostras da água obtida ao longo e também ao final do ensaio foram analisadas quanto ao pH, condutividade e determinação dos principais íons presentes. Para confecção dos corpos-de-prova cilíndricos de 15 cm x 30 cm foram utilizados os seguintes materiais:

- Aglomerante hidráulico – cimento Portland CP II – F – 32;
- Agregado miúdo: areia artificial de basalto;
- Agregado graúdo: basalto;
- Sílica ativa, marca Silmix; e
- Água potável.

A seguir, a Tabela 1 apresenta a dosagem dos CCR utilizados na pesquisa.

Tabela 1- Dosagem dos CCR usados no experimento.

Concreto		90	90S
Dados de Composição	Aglomerante total	90	90
	Cimento	90	81
	Sílica ativa	0,0	6,5
	Água	150	155
	Areia artificial	1144	1137
	Brita 25 mm	572	568
	Brita 50 mm	572	568
	Relação a/c	1,67	1,72
	% argamassa em massa	58,7	58,9
	% de pasta em massa	17,9	18,4
	% de areia em massa	50,0	50,0
	% de areia em volume	50,2	50,2

O concreto foi caracterizado no estado endurecido através de vários ensaios, e os resultados estão apresentados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Resultados dos ensaios de caracterização do concreto endurecido - Concreto 90.

Ensaio	Resultados				
	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias	154 dias
Resistência à compressão (MPa)	2,4	3,8	5,3	7,9	9,8
Módulo de elasticidade (GPa)	9,8	10,6	23,6	-	-
Permeabilidade (m/s)	-	-	$8,8 \times 10^{-11}$	-	-
Absorção por imersão (%)	-	-	4,2	-	-
Tração simples (MPa)	0,10	0,26	0,46	-	-
Tração diametral (MPa)	0,34	0,62	0,81	-	-

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de caracterização do concreto endurecido - Concreto 90S.

Ensaio	Resultados				
	7 dias	28 dias	63 dias	91 dias	154 dias
Resistência à compressão (MPa)	2,7	5,3	6,4	8,5	9,8
Módulo de elasticidade (GPa)	12,2	17,9	26,2	32,8	30,0
Permeabilidade (m/s)	-	-	$1,3 \times 10^{-11}$	-	-
Absorção por imersão (%)	-	-	3,82	-	-
Tração simples (MPa)	0,20	0,44	0,60	-	-
Tração diametral (MPa)	0,44	0,80	1,11	-	-

3 Resultados e Discussão

3.1 Percolação De Água Ao Longo Do Tempo

As Figuras 1 e 2 apresentam os resultados médios de percolação de água pura pelos corpos-de-prova ao longo do tempo, respectivamente para o concreto 90 e 90S.

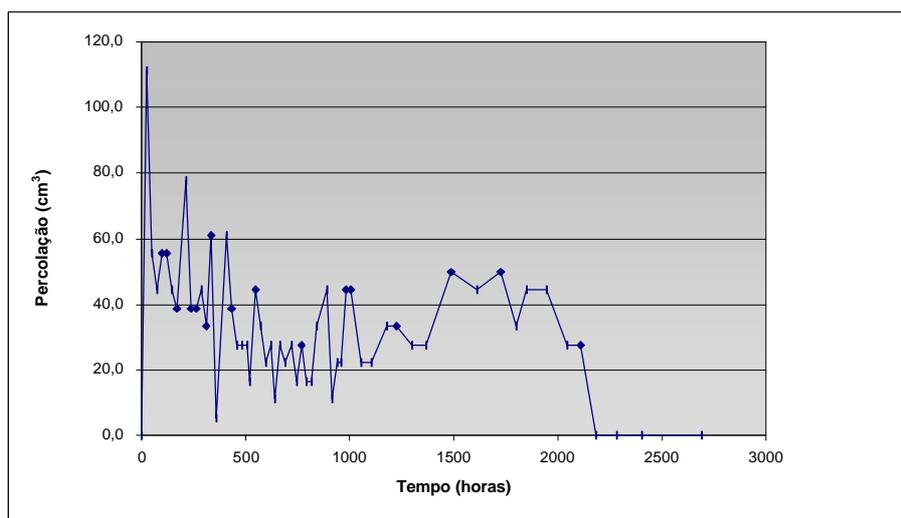


Figura 1 – Percolação média da água pura ao longo do tempo do concreto sem sílica ativa (90).

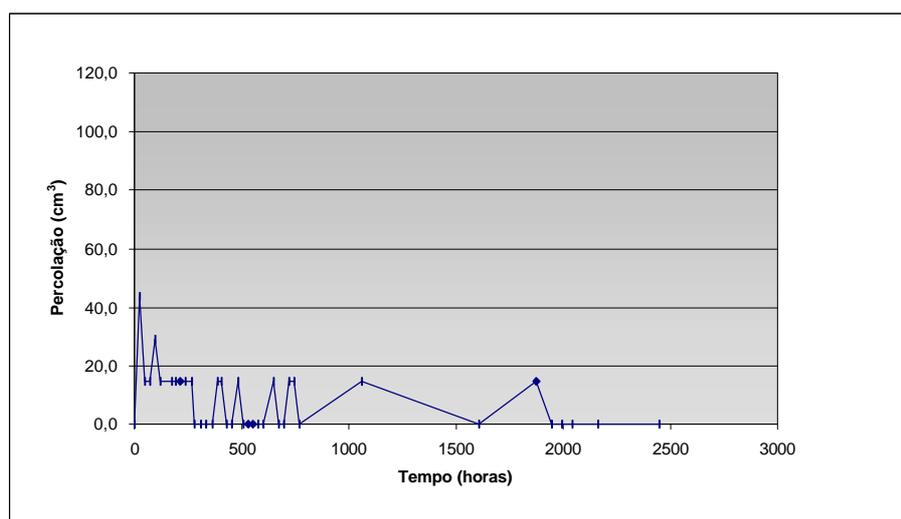


Figura 2 – Percolação média de água ao longo do tempo para o concreto com sílica ativa (90).

Observa-se na Figura 1 que o concreto dosado sem sílica apresentou uma percolação mais elevada nas primeiras horas de ensaio, e ao longo do tempo o volume percolado foi variando a todo o momento; a partir de aproximadamente 1900 horas houve uma redução do volume percolado até cessar por completo. Esse comportamento de redução da percolação pode ser explicado pela *autocompactação*, fenômeno também constatado nos estudos experimentais realizados por YAN et al. (1999), nos quais para uma mesma pressão de água aplicada em corpos-de-prova de CCR, observou-se a ocorrência de dois efeitos principais: primeiro uma redução do coeficiente de permeabilidade ao longo do

tempo ficando constante no final; o outro efeito foi a mudança não linear do coeficiente de permeabilidade, o qual eventualmente se elevava. A *autocompactação*, segundo os referidos autores, consiste em um fenômeno no qual primeiramente as bolhas de ar presentes na água ou no concreto são comprimidas pela pressão e se movem com a água em direção à região de menor pressão do corpo-de-prova; ao atingirem essa região de menor pressão, as bolhas de ar se expandem, bloqueando desta forma os poros e o fluxo da água. Uma segunda razão discutida no trabalho de YAN et al. (1999) para explicar o mecanismo da *autocompactação* é a de que quando a água passa pelos poros capilares, partículas aglomerantes eventualmente anidras se hidratam, formando assim novos produtos de hidratação, contribuindo desta maneira para bloquear a passagem do fluxo de água e reduzir a permeabilidade. Opostamente, quando o coeficiente de permeabilidade flutua ou aumenta com o tempo, isto indica que algumas novas passagens são abertas para a água em partes do corpo-de-prova de CCR, aumentando assim a permeabilidade.

Além destas explicações para a autocompactação discutidas por YAN et al. (1999), cabe adicionar a possível compactação produzida pelas partículas sólidas retiradas de uma região do corpo-de-prova de concreto e levadas para outra, contribuindo também para a obstrução dos poros e, portanto, para a redução e até a paralização total da percolação.

Ao analisar o gráfico da Figura 2 nota-se que houve uma baixa percolação de água pelo concreto com sílica, mostrando que a substituição de parte do cimento por sílica ativa é extremamente benéfica com relação à redução da conexão entre os poros capilares, que implica diretamente na diminuição da permeabilidade. Na prática não se registrou a passagem da água para o recipiente coletor, sendo que apenas a parte inferior do corpo-de-prova apresentava-se úmida. Dessa forma, para o concreto 90S (com sílica ativa) não foi possível realizar nenhuma análise química de água percolada.

3.2 Análise Química da Água Percolada

A água percolada durante o ensaio através dos corpos-de-prova do concreto 90 (sem sílica ativa) era coletada à medida que se tinha uma quantidade suficiente para a realização da análise química, sendo os resultados apresentados na Tabela 4. Nesta tabela a coluna “tempo” corresponde ao número de dias transcorridos a partir do início do ensaio até a data da coleta da amostra da água. Dessa forma, o tempo zero corresponde à água deionizada imediatamente antes de ser colocada no aparelho de permeabilidade, ou seja, antes de ser percolada através do concreto; este, por sua vez, encontrava-se no tempo zero com 63 dias de idade desde a sua moldagem. O tempo de 6 (seis) dias corresponde à primeira coleta e assim sucessivamente.

Tabela 4 - Resultados das análises químicas da água percolada no concreto 90.

Tempo (dias)	pH	Condutividade (mS/cm)	Sílica (ppm)	Ferro (ppm)	Cálcio (ppm)	Magnésio (ppm)	Alumínio (ppm)	Sódio (ppm)	Potássio (ppm)
0	6,30	0,0015	0,00	0,03	0,06	0,04	1,66	0,04	0,02
6	10,60	9,22	1,83	0,00	2,20	1,19	2,27	1215,24	75,70
11	10,90	4,27	0,00	0,00	2,27	0,04	1,60	607,65	590,02
20	11,30	2,94	5,22	1,36	33,24	0,00	1,32	354,58	354,00
25	11,50	2,41	20,30	0,08	14,09	0,00	1,73	504,30	119,90
35	11,30	1,7	15,10	0,09	129,12	0,00	0,79	276,60	236,84
45	8,60	1,87	20,40	0,00	91,96	0,00	1,20	231,12	139,12
52	8,30	1,96	53,60	0,00	72,43	0,00	1,27	245,21	133,12
67	8,30	2,94	4,17	0,00	200,54	0,00	0,26	310,88	166,24
Total	-	-	120,62	1,56	545,91	1,27	12,10	3745,62	1814,96

Obs.: ppm corresponde a mg/l

Os resultados desta tabela estão representados nos gráficos das Figuras 3 a 5, a seguir, permitindo assim uma melhor visualização e interpretação dos dados. Tais figuras apresentam as quantidades dos íons presentes na água percolada ao longo do ensaio. Foram elaborados três gráficos (todos correspondentes aos mesmos resultados das análises químicas apresentados na Tabela 4) para melhor visualização dos comportamentos de todos os íons.

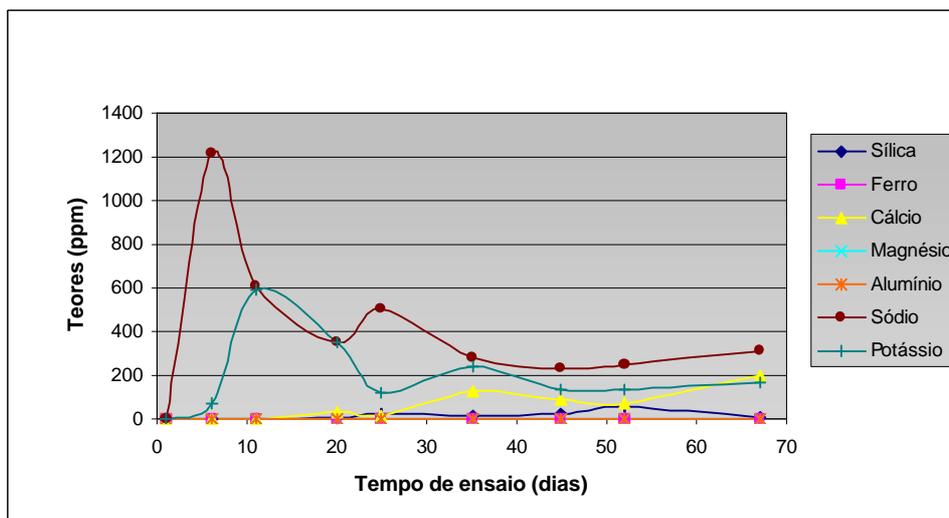


Figura 3 - Análise química da água percolada ao longo do ensaio, com a visualização de todos os íons determinados.

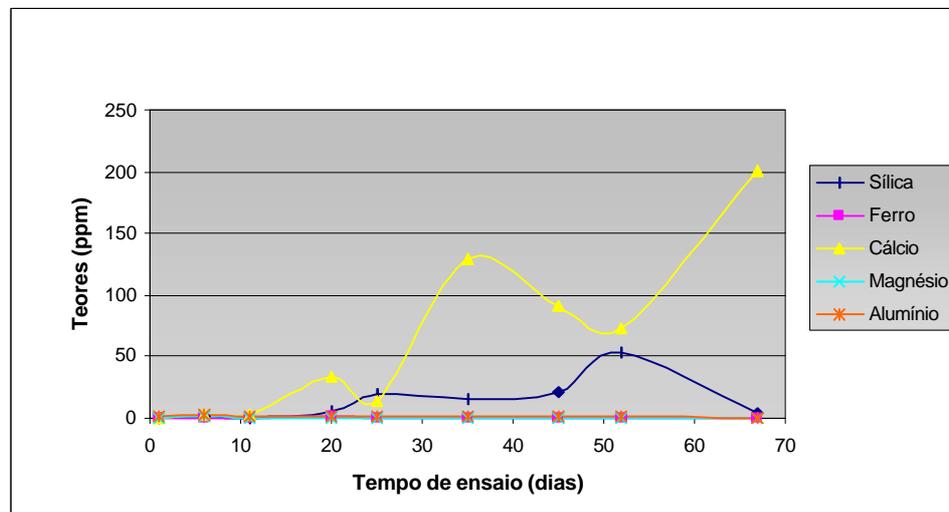


Figura 4 - Análise química da água percolada ao longo do ensaio, com a apresentação parcial dos íons determinados (excluindo-se os íons sódio e potássio, cuja ordem de grandeza dos valores é a mais elevada dentre todas).

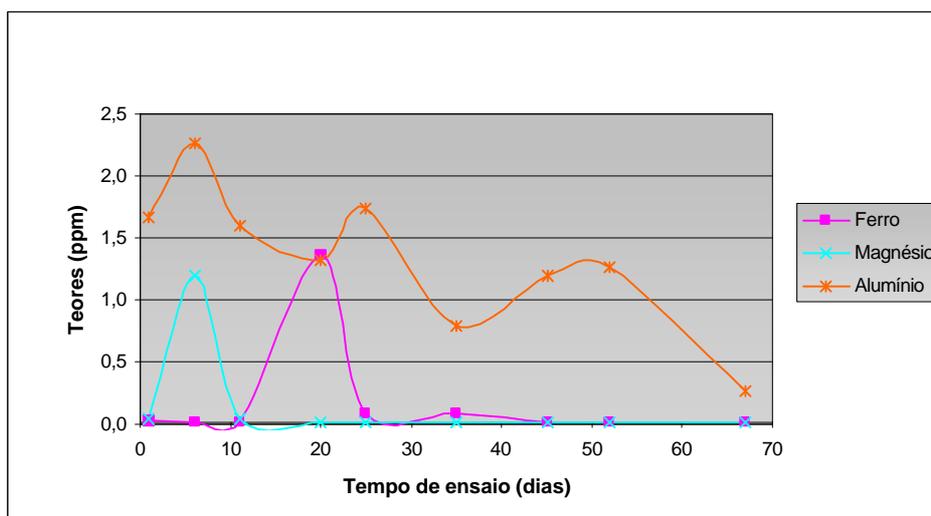


Figura 5 - Análise química da água percolada ao longo do ensaio, com a apresentação dos íons que resultaram em teores inferiores a 3 ppm.

Os íons em maiores teores presentes nas primeiras amostras de água percolada pelo concreto (6 e 11 dias) foram o sódio (1822 ppm) e o potássio (665 ppm), como pode ser visto na Figura 3. Em teores bem mais reduzidos, abaixo de 2,5 ppm, foram observados ainda os íons cálcio, magnésio e alumínio (Figuras 4 e 5). Essa água inicial percolada representa, principalmente, a remoção da solução dos poros do concreto e não a dissolução dos produtos sólidos da pasta de cimento. Isso pode ser atestado por diferentes estudos experimentais a respeito da análise de soluções dos poros de pastas de cimento Portland, nos quais em todos eles observou-se que a solução dos poros é composta principalmente por íons sódio e potássio, e em quantidades bem inferiores pelos íons cálcio e alumínio.

A partir de 20 dias de ensaio, como se vê nas Figuras 3 e 4, provavelmente se inicia a lixiviação dos compostos da pasta de cimento endurecida, pois observa-se um aumento no teor de cálcio, ocasionado pela dissolução do hidróxido de cálcio (CH) em função da retirada de boa parte dos álcalis da solução. Nota-se também que, a partir dos 25 dias de ensaio, possivelmente inicia-se a dissolução dos silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), uma vez que os teores de sílica aumentam consideravelmente e os teores de cálcio continuam sempre maiores do que aqueles das idades iniciais. Nesta etapa aparentemente existem ciclos iniciando-se principalmente com a dissolução do CH, que é o composto mais solúvel. Quando a pasta perde certa quantidade de hidróxido de cálcio, ficam

expostos o C-S-H e as fases AF_t e AF_m , que também começam a ser atacadas (hidrolisadas). Isto pode ser comprovado pela presença de sílica (que aos 25 dias apresentou um teor bem mais elevado em relação aos teores anteriores) e pelo novo aumento do alumínio (Figura 5). Desgastada essa camada de pasta a uma certa profundidade, o ciclo começa novamente dissolvendo mais CH, de uma camada mais profunda, e na etapa seguinte dissolvendo mais C-S-H e as fases AF_t e AF_m . Após o sexagésimo terceiro dia de ensaio houve uma redução gradativa da percolação até cessar por completo, não tendo sido possível, portanto, a realização de novas coletas de água. Provavelmente ocorreria a continuidade nos ciclos se a percolação não parasse.

3.3 Resistência à Compressão

Após o período de percolação num total de 125 dias, os corpos-de-prova dos concretos 90 e 90S submetidos à percolação da água pura e também os de referência (mantidos pelo mesmo período na câmara úmida) foram encaminhados para o ensaio de resistência à compressão. Os resultados obtidos estão compilados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto 90 de referência e lixiviado.

Concreto	90 (sem sílica ativa)					
	Referência			Lixiviado		
Resistência (MPa)	12,6	13,7	14,1	11,4	10,4	11,2
Média (MPa)	13,5			11,0		
Porcentagem de Redução	18,5%					

Tabela 6 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão do concreto 90S de referência e lixiviado.

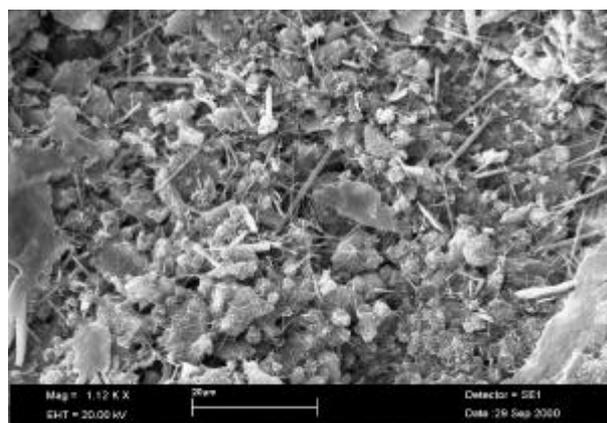
Concreto	90S (com sílica ativa)					
	Referência			Lixiviado		
Resistência (MPa)	15,1	14,0	14,5	13,5	-	14,4
Média (MPa)	14,5			14,0		
Porcentagem de Redução	3,4%					

Ao analisar os resultados do concreto 90, observa-se que após o processo de lixiviação houve um decréscimo de resistência de 18,5%. Essa perda

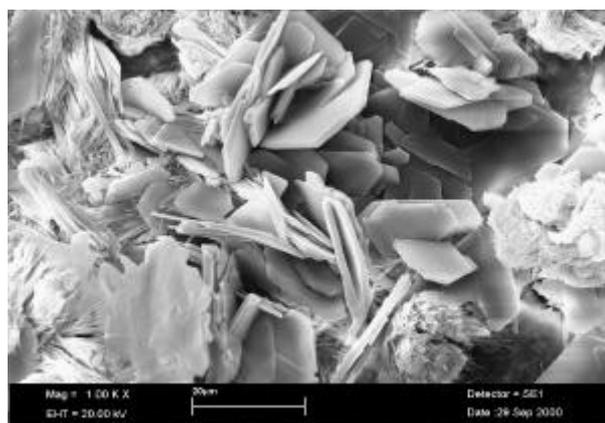
de resistência provocada pela lixiviação de compostos da pasta de cimento endurecida, principalmente hidróxido de cálcio, corrobora os resultados de vários pesquisadores, que obtiveram perdas de resistência após a lixiviação entre 20% e 60% - Bereczky citado por BICZOCK (1972), Moskwin citado por BICZOK (1972), LEA (1976), SOUKATCHOF (1985) e CARDE et al. (1997) – variações estas devidas aos diferentes tempos de duração do ataque, entre outros. Para o concreto 90S observa-se que praticamente não houve variação na resistência mecânica, sendo este resultado esperado, pois durante os ensaios de percolação a água praticamente não passou pelo concreto com sílica ativa.

3.4 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DO CONCRETO

No concreto 90 (sem sílica ativa) lixiviado, observou-se uma quantidade bastante reduzida de placas de hidróxido de cálcio, ao passo que outros produtos de hidratação, como o C-S-H, foram observados com mais frequência, conforme ilustrado na Micrografia 1. De forma contrária, no mesmo concreto, porém não submetido ao ataque (referência), foi observada uma grande quantidade de CH disperso em várias regiões das amostras analisadas, como pode ser visto na Micrografia 2 a qual possui ampliação semelhante à Micrografia 1

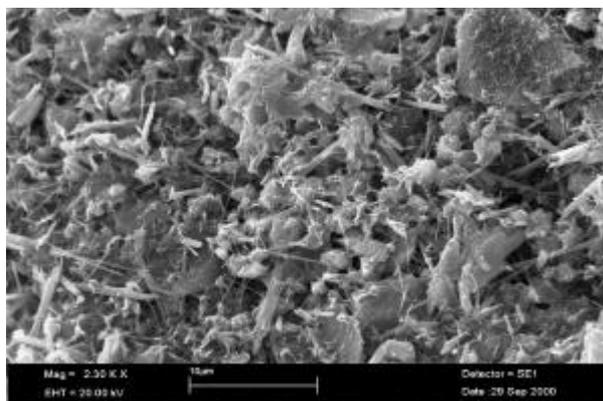


Micrografia 1 – Aspectos dos produtos de hidratação presentes no concreto 90 após a lixiviação, destacando-se a presença de C-S-H.

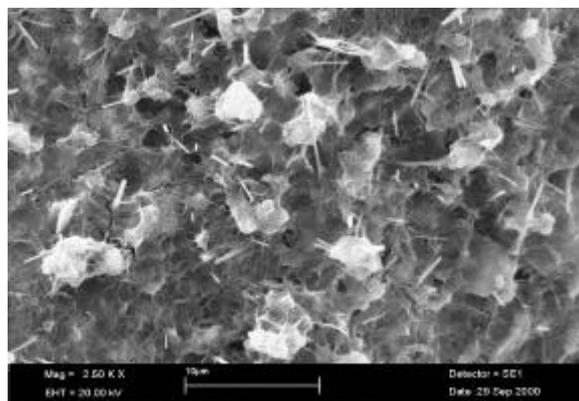


Micrografia 2 - Presença de diversas placas de hidróxido de cálcio no concreto 90 de referência).

Quando comparadas as amostras dos concretos 90 (sem sílica ativa) e 90S (com sílica ativa), após a lixiviação, observou-se que a estrutura interna do CCR apenas com cimento Portland apresentava-se mais porosa (Micrografia 3) do que aquela do CCR contendo a sílica ativa (Micrografia 4).



Micrografia 3 – Microestrutura da pasta do concreto 90 (sem sílica ativa) lixiviado.



Micrografia 4 – Microestrutura da pasta do 90S (com sílica ativa) lixiviado, podendo-se observar neste caso um grau de compactidade mais elevado.

Das micrografias anteriores, nota-se que a ação agressiva da lixiviação foi mais intensa no concreto dosado sem sílica, ocasionando a remoção dos produtos hidratados e aumentando a porosidade, ao passo que no concreto com sílica ativa os produtos de hidratação estão bastante próximos uns dos outros, denotando uma estrutura interna mais densa e homogênea, confirmando a eficiência da sílica ativa.

4 Conclusões

A realização desta pesquisa experimental produziu as seguintes principais conclusões:

- A água pura pode ser um agente bastante agressivo ao concreto compactado com rolo (CCR). Após o processo de lixiviação, observou-se no CCR proporcionado apenas com cimento Portland sem adições minerais (90) que uma pequena perda de cálcio levou a uma redução de 18,5% da resistência à compressão em comparação ao concreto de referência (corpos-de-prova mantidos na câmara úmida durante o mesmo período que os lixiviados foram submetidos à percolação da água deionizada).

- Com relação ao uso da sílica ativa em substituição parcial ao cimento Portland, verificou-se influência significativa para as propriedades do concreto compactado com rolo. Além de um ganho de resistência mecânica no concreto com esta adição mineral (quando comparados os corpos-de-prova de referência com e sem sílica ativa), o efeito principal foi a efetiva redução na permeabilidade do concreto submetido à água pura, tornando-o mais resistente em relação ao ataque produzido pela lixiviação, não mostrando variações significativas na resistência à compressão antes e após o ataque pela água.
- Sobre a microestrutura dos concretos foi possível concluir, através das análises ao microscópio eletrônico de varredura e da difração de Raios X, que a estrutura interna do CCR com sílica ativa apresentava-se mais densa, menos porosa e com uma quantidade de placas de hidróxido de cálcio inferior em relação ao concreto sem a sílica ativa, fato este explicado pela ação física e química que a sílica ativa promove no concreto. Esta melhoria da microestrutura fornecida pela sílica ativa, bastante conhecida para os concretos convencionais e de alta resistência, ficou também comprovada para o CCR, concreto este com características bem distintas dos demais.
- A realização de análise química da água percolada pelo concreto mostrou-se uma ferramenta importante no estudo do mecanismo da lixiviação, pois permite inferir sobre a dissolução dos produtos de hidratação da pasta de cimento no concreto. No caso em questão, foram observados ciclos de desgaste, iniciando pela remoção da água dos poros (contendo principalmente sódio e potássio), seguida da dissolução do hidróxido de cálcio (CH), permitindo a partir daí a dissolução de parte do C-S-H e das fases AF_t e AF_m . Desgastada uma camada, o processo inicia-se novamente com a dissolução de mais CH.

5 Referências Bibliográficas

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto endurecido: determinação do coeficiente de permeabilidade à água** - NBR 10786. Rio de Janeiro, 1989.
- BICZOK, I. **Concrete Corrosion and Concrete Protection**. Chemical Publishing Company, Inc., New York, 1972.
- CARDE, C., FRANÇOIS, R. OLLIVIER J.P. Microstructural changes and mechanical effects due to the leaching of calcium hydroxide from cement paste. In: SCRIVENER, K.L; YOUNG, J.F. ed. **Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems**. p.30-37. Boston: E&FN SPON, 1997.
- CASCUDO, O. **O Controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo, Pinj; Goiânia, Editora UFG, 1997.
- GONTIJO, M. C.; ONUMA, N. T.; VIEIRA Jr, L. P.; KUPERMAN, S. C. Efeitos da lixiviação sobre a durabilidade do concreto. In: REUNIÃO ANUAL DO IBRACON, 32., 1995, São Paulo. **Anais**. São Paulo: Ibracon, 1995, p.15-26.
- JORGE, M. **Estudo da lixiviação do concreto compactado com rolo pela ação de águas puras**. Goiânia, 2001. 122p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.
- LEA, F. M. **The Chemistry of Cement and Concrete**, London: Edward Arnoud, 1976.
- SOUKATCHOFF, P. Étude de résistance à l'eau douce de quelques ciments. **Matériaux et constructions**. P.115-122, 1985.
- YAN, R.; KUNHE, F.; LI, Z.; LING, W.; ZHENGYOUNG, H. Study on permeability and leaching attack of rcc. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE DAM, Chengdu, 1999. **Proceedings**. Chengdu, 1999. v1, p.429-436.