

ATAQUE POR SULFATOS AO CONCRETO COMPACTADO COM ROLO

GOMIDES, Maria de Jesus (1); CARASEK, Helena (2); CASCUDO, Oswaldo (3)

(1) Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás (UFG).

Telefone: (0xx62) 261-3612

(2) Professora Doutora, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

e-mail: hcarasek@cultura.com.br

(3) Professor Doutor, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

Resumo

O presente trabalho é resultado de uma pesquisa realizada para investigar o desempenho de diferentes dosagens de concreto compactado com rolo (CCR), contendo ou não em suas composições a sílica ativa em substituição parcial ao cimento, no tocante à ação agressiva dos íons sulfato. Para tanto, foram avaliadas as alterações da resistência à compressão, bem como a expansão de corpos-de-prova de concreto ao longo deste ataque de natureza química.

Com intuito de se identificar as transformações físico-químicas em nível microestrutural, ao final do experimento foram realizadas análises através da microscopia eletrônica de varredura e difração de Raios X.

Como resultado foi constatado que o ataque por sulfatos nos CCR's investigados foi em decorrência da formação de etringita e gipsita. Outro importante resultado está associado a sílica ativa, a qual propiciou uma notável melhora no desempenho de tais concretos, apesar das altas relações água/material cimentício, frente à ação agressiva dos íons sulfato.

1. INTRODUÇÃO

O ataque por sulfatos é um fenômeno patológico que vem sendo investigado desde a década de 20 (TUTHILL, 1988 apud SILVA FILHO, 1994). Apesar das inúmeras pesquisas realizadas e dos avanços decorrentes destas, ou seja, dos

conhecimentos adquiridos sobre o assunto, existem ainda, mesmo em nível internacional, muitas questões a serem respondidas, principalmente sobre os mecanismos de deterioração do concreto, devidos à ação agressiva dos íons sulfato, bem como sobre os fatores que realmente interferem no desenvolvimento destes.

Os efeitos deletérios relacionados a esse tipo de ataque químico, ou seja, a expansão, como também a redução progressiva de resistência, rigidez e massa do concreto, podem interferir na vida útil das estruturas, podendo até ocasionar a completa deterioração destas, como pode ser constatado através dos inúmeros trabalhos publicados, por diversos pesquisadores, relativos ao ataque por sulfatos. Dentre eles podem ser citados: MEHTA & WILLIAMSON (1973), CALLEJA (1986), RASHEEDUZZAFAR et al. (1990), AGUADO et al. (1996) e CRAMMOND & HALLIWELL (1997).

Neste sentido, foi realizado uma pesquisa experimental (GOMIDES, 2001) no Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S.A., situado em Aparecida de Goiânia (GO), visando estudar o desempenho de quatro diferentes dosagens de concreto compactado com rolo (CCR) frente à ação agressiva do íon sulfato.

A relevância do tema pesquisado está em determinar quais os fatores que realmente propiciam o desenvolvimento do ataque por sulfatos, já que há décadas tem-se conhecimento deste fenômeno, mas até os dias atuais os mecanismos de deterioração continuam a se manifestarem nas estruturas de concreto, sendo considerados por diversos autores, entre eles, COHEN & MATHER (1991), extremamente complexos. Com o incremento da pesquisa e dos conhecimentos sobre o assunto, poderão ser prescritas as soluções, bem como as devidas prevenções a esse ataque químico.

A escolha do concreto compactado com rolo (CCR) para o desenvolvimento da pesquisa em questão está associada ao crescente interesse do meio técnico, no entendimento do comportamento e a durabilidade deste material frente a ambientes agressivos, já que trabalhos específicos sobre o tema em questão ainda são raros.

Outro fator relevante que motivou o desenvolvimento desta pesquisa está relacionado com o papel da sílica ativa como adição mineral no concreto compactado com rolo (CCR), ou seja, quais as modificações na microestrutura e, conseqüentemente sobre as propriedades deste concreto, e principalmente sobre o melhoramento da resistência ao ataque por sulfatos que tal adição poderia

promover, visto que esse tipo de concreto possui características bem distintas dos concretos convencionais e de alta resistência.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL – MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa desenvolvida consistiu em avaliar as implicações da ação deletéria dos íons sulfato sobre a resistência à compressão, como também sobre as variações dimensionais em decorrência desse ataque químico, em quatro dosagens de concreto compactado com rolo (CCR) que estão apresentadas na Tabela 1, a seguir.

Para induzir o ataque por sulfatos, corpos-de-prova de concreto cilíndricos e prismáticos, após moldagem e permanecerem 70 dias em câmara úmida, foram submersos em solução de sulfato de sódio, durante um período de 130 dias, cuja concentração e procedimentos de preparação seguiram as prescrições da norma americana ASTM C1012-95a (1997). Tanques plásticos contendo a solução agressiva e os referidos corpos-de-prova de CCR foram armazenados em sala climatizada com temperatura de $(40 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ e umidade superior a 80%, durante todo o período de ataque. Neste ambiente, a temperatura da solução de sulfato de sódio ficou em $(30 \pm 2)^{\circ}\text{C}$. O objetivo da sala climatizada foi o de acelerar o processo de deterioração causada pela ação agressiva dos íons sulfato, como salienta o CEB (1993).

Ao longo do ataque químico, corpos-de-prova cilíndricos (15 cm x 30 cm) preestabelecidos eram retirados da solução agressiva para a realização de determinados ensaios com a finalidade de avaliar o desempenho dos quatro tipos de CCR em estudo. Tais avaliações consistiam em identificar as alterações na propriedade mecânica dos corpos-de-prova de concreto atacados, em relação aos de referência (armazenados em câmara úmida), e assim relacioná-las com os produtos provenientes das reações químicas entre os compostos hidratados do cimento e os íons sulfato presentes na solução.

Em relação aos corpos-de-prova prismáticos (15 cm x 15 cm x 60 cm), estes foram moldados para se determinar as variações dimensionais em decorrência da formação de cristais expansivos nos poros e vazios do CCR devidos às reações deletérias entre os íons sulfato e os compostos do cimento.

2.1 DOSAGEM DO CCR

Na Tabela 1 são apresentadas as dosagens dos concretos definidos para a pesquisa.

Tabela 1 – Composição dos concretos compactados com rolo estudados.

Materiais (kg/m ³)	Concretos Compactados Com Rolo			
	70	90	90S	200S
Cimento Portland CP II F-32	70	90	81	180
Sílica ativa	0,0	0,0	6,6	14,7
Água	150	150	155	158
Areia artificial de basalto	1153	1143	1136	1080
Brita 25 mm (basalto)	576	572	568	540
Brita 50 mm (basalto)	576	572	568	540

Nota: 1) Os concretos designados como 90S e 200S não possuem exatamente esse consumo de material cimentício em sua composição, pois a substituição parcial do cimento por sílica ativa é em relação ao volume do cimento.

2) O consumo de água, no caso do CCR, é fixado arbitrariamente com o objetivo de se atingir a consistência ideal, sendo esta medida realizada através do ensaio de "Cannon Time", o qual situou-se numa faixa entre 25 e 30 segundos. (FURNAS, 1997)

2.2 ENSAIOS PARA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CCR FRENTE À AÇÃO AGRESSIVA DOS ÍONS SULFATO

2.2.1 Ensaio de Resistência à Compressão

Corpos-de-prova cilíndricos de cada dosagem foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão, de acordo com as especificações da ABNT NBR 5739:1984. As idades definidas para a ruptura dos corpos-de-prova imersos em solução de sulfato de sódio, bem como os de referência, foram: 91, 154 e 200 dias, que correspondiam ao término de cada fase definida para avaliar o desempenho do CCR ao longo do ataque, ou seja, aos 21, 84 e 130 dias de imersão, respectivamente.

2.2.2 Análise Microestrutural

Os corpos-de-prova que permaneceram 130 dias imersos em solução agressiva de sulfato, após terem sido rompidos por compressão, foram submetidos a uma avaliação microestrutural através de duas técnicas de análise: microscopia eletrônica de varredura e difração de Raios X. A finalidade de tal avaliação foi identificar e correlacionar a morfologia e a composição dos produtos formados (em consequência do ataque por sulfatos) com os mecanismos de deterioração, bem como avaliar o efeito da incorporação da sílica ativa sobre a microestrutura do CCR.

Foram retiradas três amostras de cada CCR estudado (ver Figura 1), tanto dos submetidos ao ataque quanto dos de referência. As imagens foram obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV) integrado com espectrômetro de Raios X (EDX).

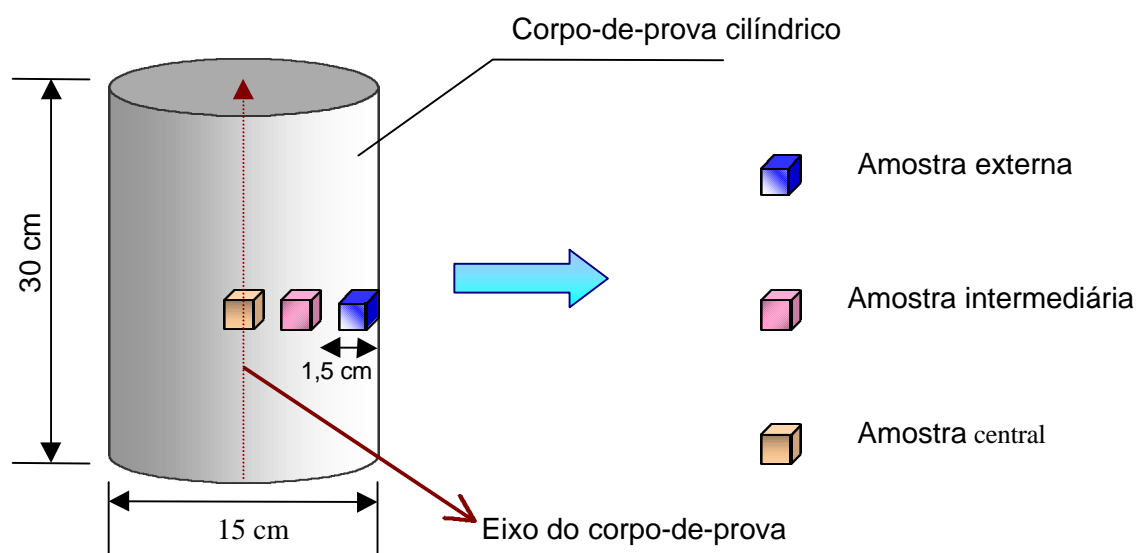


Figura 1 – Regiões extraídas dos corpos-de-prova cilíndricos para análise no MEV.

Para a difração de Raios X, duas amostras de cada CCR foram retiradas, uma na superfície e outra no centro do corpo-de-prova. O objetivo era identificar e, ao mesmo tempo, fazer uma análise semi-quantitativa dos compostos e produtos cristalinos presentes nos concretos investigados (atacados e de referência).

2.2.3 Ensaio de Avaliação da Expansão Linear do CCR Atacado

Para se diagnosticar a expansão no concreto foram utilizados extensômetros de resistência elétrica de imersão no concreto. As medidas para verificar as variações dimensionais dos corpos-de-prova prismáticos eram feitas a cada 7 dias, com o auxílio de uma ponte digital “Strain Indicator”, sendo que a primeira foi realizada aos 70 dias de idade antes destes serem imersos na solução de sulfato.

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

3.1 Resistência à Compressão

Na Tabela 2 são apresentados os resultados de resistência à compressão.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de resistência à compressão dos quatro CCR estudados, tanto os de referência quanto os atacados.

		Resistência à compressão (MPa)			
		70	91	154	200
Idade dos corpos-de-prova (dias)					
Tempo de ataque (dias)		0	21	84	130
CCR 70	Referência	4,9	5,5	6,5	6,7
	Atacado	4,9	5,6	7,0	7,6
	Diferença relativa*	-	2%	8%	13%
CCR 90	Referência	5,5	6,2	8,7	9,8
	Atacado	5,5	8,2	9,8	10,8
	Diferença relativa*	-	32%	13%	10%
CCR 90S	Referência	6,5	8,5	9,4	10,3
	Atacado	6,5	8,5	10,0	10,5
	Diferença relativa*	-	0%	6%	2%
CCR 200S	Referência	17,4	20,1	21,8	22,9
	Atacado	17,4	22,7	25,3	22,9
	Diferença relativa*	-	13%	16%	0%

Nota (*): Diferença relativa = $\frac{\text{resistência do corpo-de-prova atacado} - \text{resistência do corpo-de-prova de referência}}{\text{resistência do corpo-de-prova de referência}}$

3.2 Análise Microestrutural

Todas as amostras retiradas, não só a da superfície, mas, também a do centro e a intermediária, dos vários corpos-de-prova imersos em solução de sulfato de sódio, assim como os armazenados em câmara úmida, estavam bastante úmidas. Verificou-se também que as amostras dos concretos submetidos à ação dos íons sulfato foram mais facilmente extraídas, revelando a frágil aderência entre a pasta e o agregado graúdo; sendo que, muitas vezes, a pasta de cimento se desfazia ao ser tocada, como conseqüência da perda de coesão provocada pelo ataque, como pôde ser observado nos CCR 70 e CCR 90, sendo este aspecto mais acentuado, principalmente no primeiro concreto. Em relação aos concretos com sílica ativa (denominados de CCR 90S e CCR 200S) essa fragilidade foi bem menos acentuada, sendo estes, portanto, mais resistentes ao processo de extração.

De forma concisa, as informações mais relevantes sobre todos os produtos observados ao longo da análise feita ao microscópio eletrônico de varredura, referentes ao CCR 70, 90 e 200S, estão contidas nas Tabelas 3 a 5, respectivamente. No caso do CCR 90S não foram visualizados produtos que denotassem o ataque por sulfatos (etringita e/ou gipista). Basicamente, apenas o C-S-H foi encontrado nas amostras investigadas sob ataque e nas de referência do CCR 90S.

Tabela 3 - Produtos observados no CCR 70 de referência e atacado por meio de análises realizadas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Camada	Produto	Etringita		Aluminato de cálcio	C-S-H	Silicoaluminato de cálcio
		<i>acículas alongadas delgadas (aglom.*)</i>	<i>crístais curtos comprimidos</i>	<i>crístal irregular</i>	<i>reticulado cristalino (gel)</i>	<i>Crístal Irregular</i>
CCR 70	Referência	x	x	-	x	-
	Atacada	-	x	-	x	-
Externa	Referência	-	-	x	x	-
	Atacada	-	-	-	x	x
Intermediária	Referência	-	-	-	x	-
	Atacada	-	-	-	x	x
Central	Referência	-	-	-	x	-
	Atacada	-	-	-	x	x

Nota: aglom.* = aglomeradas

Tabela 4 - Produtos observados no CCR 90 de referência e atacado por meio de análises realizadas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Camada	Produto	Etringita			Hidróxido de cálcio	Aluminato de cálcio	C-S-H
		<i>acículas alongadas delgadas (aglom. *)</i>	<i>crístais curtos comprim#</i>	<i>conjuntos acículas curtas delgadas</i>	<i>crístal hexagonal</i>	<i>crístal hexagonal e irregular</i>	<i>reticulado cristalino (gel)</i>
Externa	Referência	-	-	-	X	-	X
	Atacada	X	X	X	-	X	X
Intermediária	Referência	-	-	-	-	-	X
	Atacada	-	X	-	-	-	X
Central	Referência	-	-	-	-	-	X
	Atacada	-	-	-	X	-	X

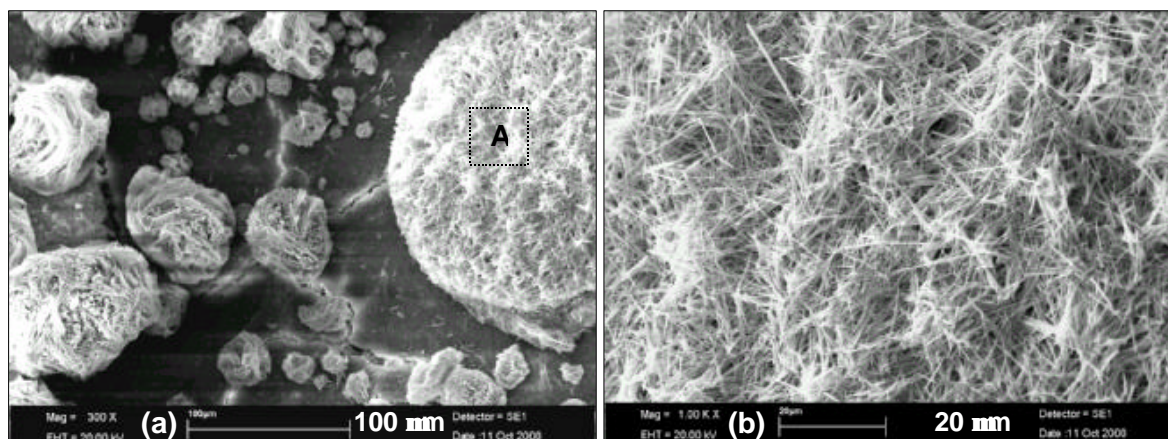
Nota: aglom.* = aglomeradas e comprim#. = comprimidos

Tabela 5 - Produtos observados no CCR 200S de referência e atacado por meio de análises realizadas com o microscópio eletrônico de varredura (MEV).

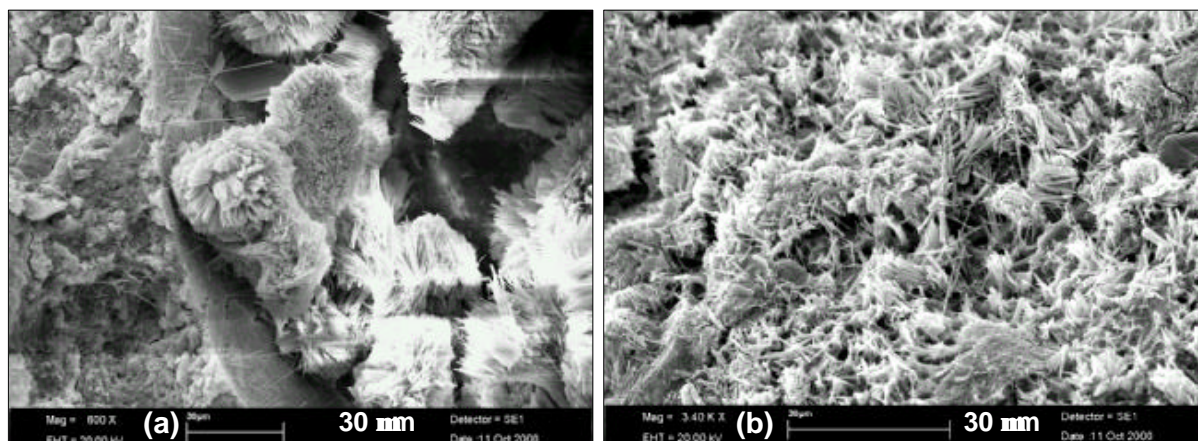
Camada	Produto	Etringita		Hidróxido de cálcio	C-S-H	Gipsita
		<i>crístais curtos comprimidos</i>	<i>conjuntos acículas curtas delgadas</i>	<i>crístal irregular</i>	<i>reticulado cristalino (gel)</i>	<i>placas irregulares aglomeradas (sobrepostas)</i>
Externa	Referência	-	-	-	X	-
	Atacada	X	X	X	X	X
Intermediária	Referência	-	-	-	X	-
	Atacada	-	-	X	X	-
Central	Referência	-	-	-	X	-
	Atacada	-	-	X	X	-

Tem-se conhecimento que a etringita pode se cristalizar em diferentes formas, como relatado primeiramente por MEHTA (1976) e endossado por outros pesquisadores, entre eles, DIAMOND (1986) e LOUARN (1993) apud BRETANHA (2000). Segundo estes autores, a etringita pode apresentar características distintas sob determinadas condições, algumas vezes pode ter seção transversal circular irregular, podendo ser oca ou parcialmente oca, e possuir uma expressiva variação na relação comprimento/espessura, apresentando-se, por vezes, curta, ou até no

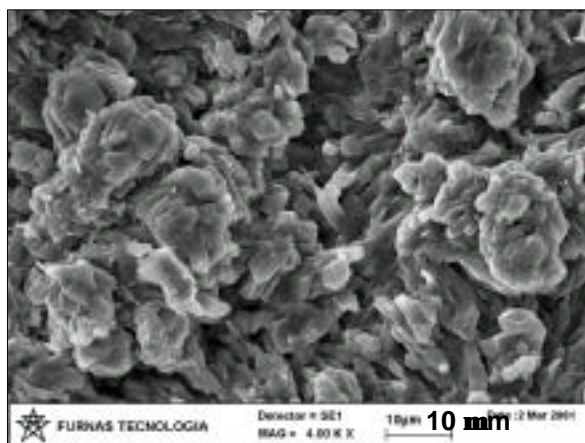
formato de uma haste pontiaguda. Nas Micrografias 1 e 2 são apresentadas algumas estruturas cristalinas observadas ao MEV e cujas composições químicas (obtidas através da microanálise) revelaram se tratar do mesmo produto: trissulfato de cálcio hidratado, ou seja, etringita. Na Micrografia 3 são ilustrados cristais de gipsita, cuja morfologia é diferente das relatadas por THAULOW & JAKOBSEN (1995) e MONTENY et al. (2000).



Micrografias 1 - (a) CCR 90 ~ atacado ~ camada externa – Imagem geral do poro parcialmente preenchido por produtos formados decorrentes do ataque por sulfatos. (b) CCR 90 ~ atacado ~ camada externa – Imagem ampliada do conjunto de cristais de etringita identificado pela região A na micrografia 1(a), cuja morfologia são acículas delgadas e alongadas.



Micrografias 2 – (a) CCR 90 ~ atacado ~ camada externa – Conjunto de inúmeros cristais de etringita curtos e delgados encontrados no interior do poro. (b) (a) CCR 70 ~ atacado ~ camada externa – Morfologia típica de cristais de etringita formados devido ao ataque por sulfatos: curtos e adensados.



Micrografia 3 - CCR 200S ~ atacado ~ camada externa – Morfologia dos cristais de gipsita (sulfato de cálcio) encontrados na superfície da amostra.

No estudo da microestrutura por difração de Raios X, ao se analisar e comparar os difratogramas, independente da condição em que os corpos-de-prova de CCR foram expostos, notou-se não ser possível perceber diferenças significativas entre eles. Somente no caso do CCR 90, como também na amostra referente a camada externa do CCR 200S, pôde-se verificar diferenças entre os difratogramas concernentes às amostras atacadas e de referência, qual seja, a presença de picos específicos de etringita ($d = 9,8\text{\AA}$ e $5,7\text{\AA}$), estes inexistentes nos demais difratogramas relativos aos CCR 70 e CCR 90S, bem como os picos denotando a existência de gipsita ($d \cong 11,5\text{\AA}$ e $7,5\text{\AA}$).

3.3 Expansão

Este ensaio apresentou uma série de problemas, tendo sido perdidos vários corpos-de-prova, o que dificultou a realização da análise global comparativa dos resultados. Contudo, a despeito dos problemas em questão, foram possíveis de se obter os resultados concernentes ao concreto CCR 90, cuja curva dos valores de expansão ao longo do tempo apresenta-se, a seguir, na Figura 2.

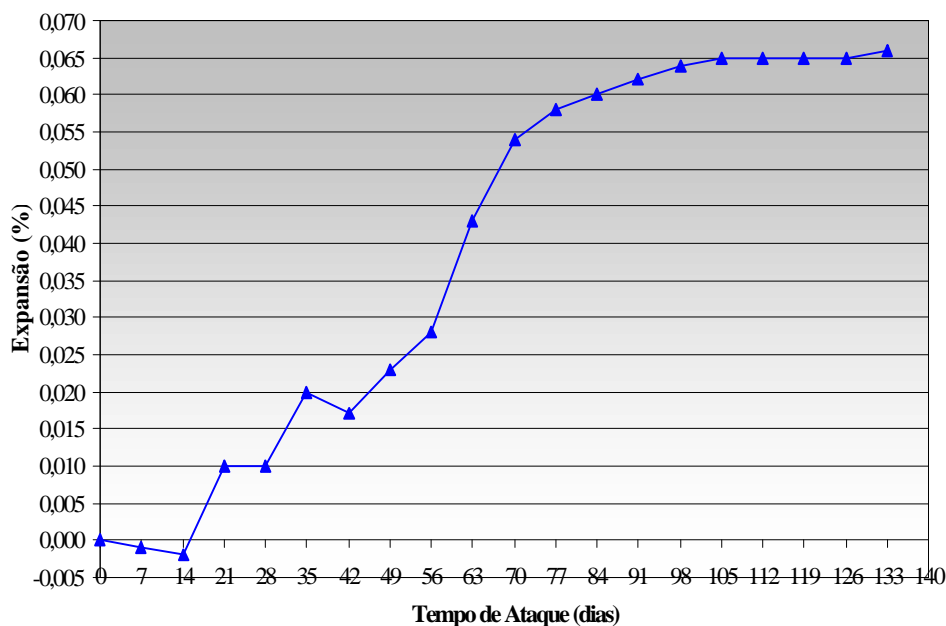


Figura 2 – Medidas de expansão em corpos-de-prova de concreto compactado com rolo, referentes ao CCR 90, em função do tempo de ensaio em imersão em solução de sulfato de sódio (concentração de 5%).

4. DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS

De uma forma geral, os corpos-de-prova atacados apresentaram resistências superiores aos de referência na mesma idade. Isto acontece porque, sendo os concretos estudados bastante porosos, durante o período de ataque, ocorreu um preenchimento dos poros com os produtos de reação, etringita e gipsita. Esse preenchimento levou a uma compactação dos poros e, conseqüente, aumento de resistência. Resultados semelhantes também foram verificados ao estudarem o ataque por sulfatos em concretos convencionais por SILVA FILHO (1994), AL-AMOUDI et al. (1995), SILVEIRA (1996) e BRETANHA (2000).

No caso do CCR 70, as diferenças entre as resistências dos corpos-de-prova atacados e de referência foram sempre crescentes. Isto pode ser explicado pelo fato deste concreto ser bastante poroso (devido ao seu baixo consumo de cimento e, conseqüente, elevada relação água/cimento) e, portanto, no período de ataque analisado a formação dos produtos expansivos não ter sido suficiente para preencher grande parte do volume dos poros. Já no caso do CCR 90 observa-se um comportamento contrário, ou seja, as diferenças nas resistências diminuem com o tempo, passando de 32% para 13% e, por fim, para 10%. Esse comportamento pode

ser explicado com base na curva de expansão mostrada na Figura 2. Nela, observa-se nas primeiras idades do ataque (até os 14 dias) um estágio de dormência na expansão, ocasionado pelo processo de colmatação dos poros pelos produtos do ataque por sulfatos. Em período equivalente de ataque, concernente à análise da resistência à compressão, observa-se a maior diferença relativa entre os corpos-de-prova atacados e de referência, ou seja, de 32%, justamente devida à essa ação de colmatação. Com o decorrer do processo, os corpos-de-prova sob a ação de sulfatos vão adquirindo tensões internas, cujo efeito é o de reduzir gradativamente a diferença de resistência com relação aos corpos-de-prova de referência.

Ao correlacionar-se a diferença relativa, em valores percentuais, entre as resistências à compressão do CCR 90 atacado e de referência, com os seus valores de expansão é possível observar o que foi comentado no parágrafo anterior, qual seja, que aos mais altos níveis de expansão (cessada a colmatação significativa dos poros) são obtidas correspondentemente menores diferenças relativas de resistência entre concretos atacados e não atacados. Na Figura 3 salienta-se um ajuste por regressão linear entre as requeridas variáveis, de inversa proporcionalidade entre elas.

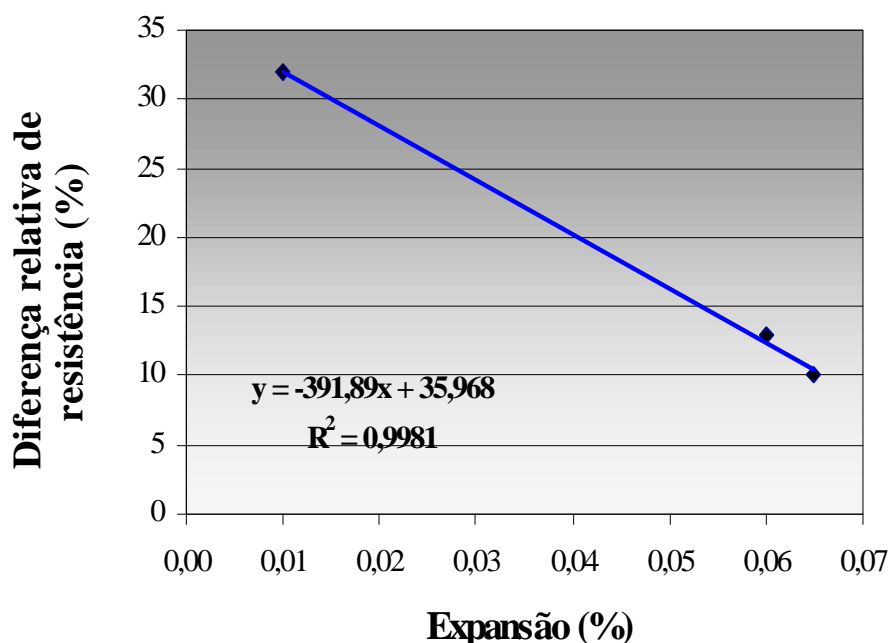


Figura 3 – Relação entre a diferença relativa de resistência à compressão do CCR 90 atacado e de referência, e a expansão do CCR 90 atacado.

No caso do CCR 90S, contendo sílica ativa em substituição parcial ao cimento, observa-se que praticamente não ocorreu ganho de resistência após a imersão na solução agressiva nas várias idades analisadas. Juntando este resultado com as informações obtidas no estudo da microestrutura pode-se afirmar que esse concreto não foi atacado pelos sulfatos, durante o período de análise. GHAFoori & ZHANG (1998) obtiveram resultados também positivos ao utilizaram a cinza volante como adição mineral em CCR.

O CCR 200S, apesar do maior consumo de cimento e menor relação água/material cimentício, não apresentou um bom comportamento frente à ação do sulfatos. Pode-se observar na Tabela 2 diferenças relevantes entre as resistências dos corpos-de-prova atacado e de referência, o que mostra que houve inicialmente colmatação dos poros por produtos expansivos do ataque por sulfatos, elevando a resistência desses concretos sob ataque. À medida que ocorre expansão ao longo do período de ensaio, as diferenças relativas entre os corpos-de-prova atacado e os de referência diminuem (chegando até a se igualarem). Este resultado confirma a existência do ataque para o CCR 200S, corroborando o que foi visto nas análises ao MEV, em que foram visualizadas fissuras e constatada a presença de etringita e gipsita. Portanto, contrariamente ao CCR 90S, o CCR 200S sofreu ataque. Ele também, de forma incoerente, foi o que apresentou os mais altos valores de absorção e permeabilidade dentre todos os concretos estudados, inclusive em relação ao CCR 70. As razões para explicar tal desempenho, a priori inesperado, podem estar associadas à composição inadequada do concreto frente ao seu processo de compactação. Neste sentido, considerando o seu maior consumo de material cimentício e menor relação água/material cimentício, é possível que a energia de compactação não tenha sido suficiente adensar adequadamente o concreto, tendo-se como resultado uma estrutura interna com maiores quantidades de vazios e mais permeável.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quanto à diversidade morfológica para os cristais de etringita observados ao MEV, esta pode estar relacionada com determinadas condições, dentre elas, o espaço disponível para a cristalização destes, de acordo com MEHTA (1976), bem

como com a concentração de íons OH^- presentes na solução dos poros (MEHTA, 1983 apud DAY, 1992).

A incorporação da sílica ativa em substituição parcial ao cimento propiciou a redução da permeabilidade do CCR 90S, ao tornar a estrutura interna deste mais densa e, conseqüentemente, mais resistente ao ataque químico, ao se comparar com o concreto de composição similar, porém, sem a incorporação da sílica ativa (CCR 90).

As razões para concreto com maior consumo de material cimentício (CCR 200S) ter apresentado uma baixa resistência ao ataque por sulfatos podem estar associadas à composição inadequada do concreto frente ao seu processo de compactação.

Com relação à expansão observada no CCR 90 pode-se concluir, que a partir do momento que os produtos formados (etringita e gipsita) pelas reações deletérias começaram a colmatar parte do volume dos poros deste, passando gradativamente a tensionar a estrutura da pasta de cimento endurecida, a expansão começou a manifestar-se. Ao longo do ataque notou-se ainda a estabilização deste processo, que pode estar associada ao preenchimento parcial dos poros, dificultando a entrada e difusão de novos íons sulfato (em conseqüência da redução da permeabilidade do sistema), bem como ao próprio consumo das fases aluminato presentes na pasta de cimento. Fatores estes que certamente contribuíram para reduzir a dinâmica do processo de expansão existente, conforme também observado por GHAFoori & Cai (1998) e GHAFoori & Zhang (1998) em estudos do ataque por sulfatos ao CCR.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; CÁNOVAS, M. F.; SALLA, J. M. **Diagnósticos de daños y reparación de obras hidráulicas de hormigón**. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Almagro, Madrid, 1996.

AL-AMOUDI, O.S.B.; MASLEHUDDIN, M.; SAADI, M.M. Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements. **ACI Materials Journal**, v. 92, n. 1, p. 15- 24 , 1995.

ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C-1012/95a. **Standard test method for length change of**

hydraulic - cement mortars exposed to a sulfate solution. Philadelphia, 1997. section 4 (Construction), v. 04.01(cement; lime; gypsum), p. 467 - 471.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto - ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos.** NBR 5739, Rio de Janeiro, 1994.

BRETANHA, A. M. **Resistência a sulfatos de concretos contendo diferentes tipos de cimento e adições de cinza de casca de arroz.** Porto Alegre, 2000. 133 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

CALLEJA, M. Future trends in research of the structure, properties and behaviour of blended cements. In: INTERNATIONAL CONGRESS CHEMISTRY CEMENT, 8., Rio de Janeiro, 1986. **Anais.** v. 1, p. 233- 248.

COHEN, D. M.; MATHER, B. Sulfate attack on concrete – Research needs. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 1, p. 62 - 69, 1991.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durabilidade de estruturas de hormigón.** Guia de diseño CEB. Madrid, oct., 1993. (GEHO - CEB, Boletín, 12).

CRAMMOND, N. J.; HALLIWELL, M. A. Assessment of the conditions required for the thaumasite form of sulphate attack. In: SCRIVENER, K. L.; YOUNG, J.F., eds. **Mechanisms of chemical degradation of cement – based systems.** Boston, E & FN SPON, 1997. p. 193- 200.

DAY, R.L. **The effect of secondary ettringite formation on the durability of concrete: A literature analysis.** PCA Research and Development Bulletin RD 108T. Canada: Portland Cement Association, 1992. 118p.

DIAMOND, S. The microstructures of cement paste in concrete. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 8., Rio de Janeiro, 1986. **Anais.** v. 1, p. 122 - 147.

FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo: ensaios e propriedades.** Pacelli de Andrade, W., ed. São Paulo, PINI, 1997.

GHAFOORI, N.; CAI, Y. Laboratory-made roller compacted concretes containing dry bottom ash: Part II- Long – term durability. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 3, p. 244 - 251, 1998.

GHAFOORI, N.; ZHANG, Z. Sulfate resistance of roller compacted concrete. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 4, p. 347 - 355, 1998.

GOMIDES, M. J. **Ataque por sulfatos ao concreto compactado com rolo.** Goiânia, 2001. 176 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás.

MEHTA, P. K.; WILLIAMSON, R. B. Durability of cement concrete in sulfate environment. Califórnia, sept., 1973, **Structures and Materials Research**, (REPORT n^o UC SESM 73-12).

MEHTA, P. K. Scanning electron micrographic studies of ettringite formation. **Cement and Concrete Research**, v. 6, n. 2, p. 169 - 182, 1976.

MONTENY, J.; VINCKE, E.; BEELDENS, A.; DE BELIE, N.; TAERWE, L.; VAN GEMERT, D.; VERSTRAETE, W. Chemical, microbiological, and in situ test methods for biogenic sulfuric acid corrosion of concrete. **Cement and Concrete Research**, 30, p. 623 - 634, 2000.

RASHEEDUZZAFAR; DAKHIL, F. H.; AL-GAHTANI, A. S.; AL-SAADOUN, S. S.; BADER, M.A. Influence of cement composition on the corrosion of reinforcement and sulfate resistance of concrete. **ACI Materials Journal**, v. 87, n.2, p.114- 122, 1990.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssílica**. Porto Alegre, 1994. 143 p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SILVEIRA, A. A. **A utilização de cinza de casca de arroz com vistas a durabilidade de concretos: Estudo do ataque por sulfatos**. Porto Alegre, 1996. 139 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

THAULOW, N.; JAKOBSEN, U. H. The diagnosis of chemical deterioration of concrete by optical microscopy. In: SCRIVENER, K. L.; YOUNG, J. F., eds. **Mechanisms of chemical degradation of cement -based systems**. Boston, E & FN SPON, 1997. p. 03 - 13.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil de FURNAS Centrais Elétricas S.A. (Aparecida de Goiânia - GO); na pessoa do Eng. Walton Pacelli de Andrade e do seu assessor direto, Eng. Rubens Bittencourt, pela viabilização do trabalho experimental. Expressamos também sinceros agradecimentos às engenheiras Elizabeth Leopoldina Batista e Nicole P. Hasparyk pela realização das análises ao MEV.