

3º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas

Seminário Internacional “South American Tunnelling – SAT 2012”

Contribuição para estudo do efeito da autocicatrização em concretos ativado por catalisadores cristalinos em estruturas de túneis submetidas à exposição contínua de água

Emilio Minoru Takagi¹; Maryangela Geimba de Lima²; Paulo Roberto do Lago Helene³.

Resumo – Este artigo tem como objetivo contribuir para o estudo do efeito de autocicatrização ativado por catalisadores cristalinos em concretos de alto desempenho quando submetidos à exposição contínua de água, como parte do programa de pesquisa de pós-graduação desenvolvido no Instituto Tecnológico de Aeronáutica. Para esta finalidade, um catalisador cristalino específico foi selecionado para investigar o potencial para atuar como agente autocicatrizante em estruturas de concretos de túneis. Corpos-de-prova de concreto de alto desempenho foram preparados com e sem a adição destes catalisadores cristalinos tendo uma relação água/cimento constante de 0,5. Aos 28 dias de idade, uma carga de compressão uniaxial foi aplicada para gerar microfissuras no concreto, onde os corpos-de-prova cilíndricos foram pré-carregados por 2 minutos até 90% da carga máxima de ruptura à compressão. A extensão do dano foi determinada como uma porcentagem da perda de propriedades mecânicas e um percentual de aumento nas propriedades de permeabilidade que foram monitorados durante 28 e 56 dias adicionais necessários para a autocicatrização destas microfissuras. Os resultados da recuperação de resistência e permeabilidade foram atribuídos à autocicatrização destas microfissuras pré-existentes, devido à hidratação latente das partículas anidras do cimento e principalmente pelo efeito ativador do catalisador cristalino sobre as superfícies destas microfissuras. O conhecimento desenvolvido neste artigo possibilitou que esta tecnologia de autocicatrização pudesse ser observada em uma área teste de 80 m² deste concreto autocicatrizante projetado em túnel, visando dar subsídios para serem utilizadas em especificações nos sistemas de impermeabilização de estruturas subterrâneas submetidos à exposição contínua de água, principalmente em estruturas de túneis rodoviários, ferroviários e metroviários.

Palavras-Chave – concreto autocicatrizante; catalisadores cristalinos; impermeabilização de túneis.

1. INTRODUÇÃO

Em 2005, foi criado pela RILEM⁴ um novo comitê técnico SHC 221 para o estudo dos “Fenômenos de autocicatrização em materiais de base cimentícia”, inspirados nas antigas estruturas centenárias que tem sobrevivido por séculos devido à inerente capacidade de autocicatrização dos aglomerantes utilizados para cimentar os blocos destas construções. O concreto, sendo universalmente usada como material de construção e devido a sua importância, continuará a exigir mais pesquisas para resolver o inevitável problema do fissuramento (RILEM, 2005).

No entanto, seria interessante que os efeitos de autocicatrização de fissuras no concreto fossem estabelecidos na forma de uma tecnologia de concretos autocicatrizantes, baseada em pesquisas teóricas e experimentais, através de uma discussão abrangente das leis que regem os processos químicos, físicos e biológicos envolvidos nestes fenômenos, de modo que estabelecer quais devam ser os parâmetros para o estudo de traços de concretos de concretos autocicatrizantes de alto desempenho visando projetar estruturas de concreto submetidas à exposição contínua à água mais duráveis.

1.1. Fenômeno de autocicatrização

O termo “fenômeno de autocicatrização” tem intrigado pesquisadores há mais de cem anos. Na maioria dos estudos a aparente diminuição da permeabilidade é incorretamente atribuída ao efeito autocicatrizante. Este erro é especialmente comum em investigações onde é medida apenas a penetração da água, e o fluxo através do corpo-de-prova permanece desconhecido. Este último é de primordial importância, pois o fenômeno de autocicatrização não é o resultado de um ensaio em particular, mas resulta da interação entre a microestrutura e o fluido que a permeia (Edvardsen, 1999). O fenômeno de autocicatrização, que é largamente atribuído à dissolução e a deposição de hidratos induzida por catalisadores ativos, deve ser diferenciado do fenômeno da colmatação autógena, que é devido à hidratação contínua de materiais não hidratados com a nucleação de calcita (CaCO₃) e subsequente crescimento de

¹ Gerente técnico da MC-Bauchemie Brasil / Mestrando do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Rua Henri Martim, 235 – Vargem Grande Paulista / SP – Tel.: (11) 4159-3050 E-mail: emilio.takagi@mc-bauchemie.com.br

² Profa. Dra. do Instituto Tecnológico de Aeronáutica - Divisão de Engenharia Civil - Chefe da Divisão de Cooperação – IEXC Praça Marechal Eduardo Gomes, 50 – São José dos Campos / SP – Tel.: (12) 3947-6832 E-mail: magdlima@ita.br

³ Prof. Titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Construção Civil Rua Visconde de Ouro Preto, 201 – São Paulo / SP – Tel.: (11) 2501-4822 E-mail: paulo.helene@concretophd.com.br

⁴ RILEM - Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux - União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas e Estruturas de Construção

cristais. Duas diferenças principais são: (a) o efeito autocicatrizante é observado mesmo em um sistema fechado de CO₂, onde não é possível a carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) dissolvido no concreto, e (b) o fenômeno de autocicatrização torna-se significativo após intensa microfissuração, geralmente causada por retração por secagem e/ou carregamento cíclico durante a vida útil de uma estrutura de concreto. Ambas são dependentes da exposição à água, enquanto que o fenômeno da hidratação continua pode prosseguir sob condições latentes (Hearn, 1998).

Recentemente, várias pesquisas têm observado a formação de produtos cimentícios, tais como as fases AFt e AFm e CaCO₃ nas fissuras e cristais de Ca(OH)₂ nos vazios de ar do concreto fissurado. A hipótese que pode ser considerada é que estes produtos de hidratação foram lixiviados junto com a água que tenha permeado pela fissura e recristalizados. Verificou-se que, o catalisador cristalino autocicatrizante selecionado neste estudo, pode afetar significativamente a formação de produtos reidratados com elevada estabilidade química, bem como uma maior velocidade de autocicatrização, e não apresenta a perda na recristalização dos produtos, que são compostas principalmente de fases fibrosas da nucleação da calcita e do catalisador cristalino e, isso indica que essas fases fibrosas desempenham um papel importante no preenchimento das fissuras (Ahn & Kishi, 2010).

Vários catalisadores autocicatrizantes ativos têm sido propostos para reforçar a capacidade de autocicatrização do concreto. Enquanto que a maioria dos agentes autocicatrizantes é de base química, mais recentemente, também tem sido considerada a possibilidade de aplicação de bactérias como agente autocicatrizante (Wiktor & Jonkers, 2011).

1.1. Tecnologia de concretos autocicatrizantes

Portanto, o objetivo deste artigo é desenvolver esta tecnologia de concretos autocicatrizantes para uma aplicação prática num futuro próximo, é importante também conhecer sobre os mecanismos individuais dos três fenômenos de autocicatrização e suas condições de atuação. É bem conhecido que, à medida que a hidratação do concreto evolui a sua permeabilidade diminui. Entretanto, o fenômeno da hidratação contínua, não é único mecanismo que causa tais reduções. Tanto o mecanismo do fenômeno da colmatação autógena no que se refere à carbonatação do Ca(OH)₂ dissolvido do concreto, onde sua colmatação ocorre mais rápido quanto mais estreita é a fissura, como o mecanismo do fenômeno autocicatrizante, que é largamente atribuído à dissolução e redeposição de hidratos, também podem reduzir significativamente a sua permeabilidade.

A fim de estabelecer os parâmetros para o estudo de traços destes concretos de alto desempenho com capacidades autocicatrizantes robustas, os métodos que podem ser aplicadas, são tais como (a) para o mecanismo de hidratação contínua: o uso de cimento tipo CPIII ou CPIV, como também a substituição parcial de cimento por grandes volumes de materiais pozolânicos, como cinzas volantes, sílica ativa e / ou de alto-forno escória, que está relacionado com o preenchimento progressivo das fissuras internas pelo gel de C-S-H recém-formado devido à reação pozolânica, (b) para o mecanismo da colmatação autógena: a adição de fibras dúcteis, como as de vidro, para reforçar a matriz cimentícia, e/ou incorporando adições compensadoras de retração (sulfoaluminatos de cálcio sinterizados), colaboram para a diminuição da abertura das fissuras tornando mais fácil a formação de cristais de carbonato de cálcio devido ao espaço apertado entre as fases fibrosas, levando à redução da permeabilidade à água e a recuperação da resistência à tração, e (c) para o mecanismo do efeito de autocicatrização: o uso de geomateriais minerais e agentes químicos baseados em carbonatos, atuando como catalisadores cristalinos para provocar um efeito de recristalização cimentícia nos vazios do concreto fissurado, a fim de melhorar a estabilidade química da recristalização e a velocidade de autocicatrização.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL EM LABORATÓRIO

2.1. Concreto de alto desempenho (CAD)

Um estudo de traço padrão foi preparado tendo uma relação água/cimento constante de 0,50 e utilizando dois tipos de cimento compostos, sendo um cimento de escória de alto-forno tipo CPIII (conteúdo de escória <70%) e outro cimento Portland composto com escória de alto-forno tipo CPII-E (conteúdo escória <25%), sem e com a adição de catalisadores cristalinos, numa proporção de 2,5% em peso do consumo de cimento. Ao todo, quatro diferentes misturas de CAD com adição de fibras de vidro foram produzidos para o programa experimental de testes. A composição do concreto é dado na Tabela 1 e as propriedades estão resumidas na Tabela 2, que foi otimizada sob os aspectos de trabalhabilidade, impermeabilidade e custos.

Tabela 1. Composição padrão do traço do concreto utilizado (kg/m³)

Relação a/c	Cimento	Agregado	Adições e Aditivos
0,5	392	1749	4,0 PCE / 2,4 FK / 2,0 VMA / 10,0 XA / 0,9 GF
	PCE		Superplastificante de éter de poliacarboxilato (1.0%)
	FK		Superplastificante polifuncional (0,6%)
	VMA		Aditivo modificador de viscosidade (0.5%)
	XA		Catalisadores cristalinos (2.5% do peso do cimento)
	GF		Fibra de vidro AR (Resistente à alcalinidade - 12 mm).

Tabela 2. Propriedades dos traços de concretos utilizados

Traço	Resistência à compressão (MPa - 28 dias)	Ar incorporado (%)	Espalhamento Flow (mm)	Penetração de água (mm - 0,7 MPa)
1	53,3	0,7	700	20
2	51,2	0,8	760	22,5
3	53,4	0,7	730	20
4	47,2	0,7	780	25
Traço 1 cimento CPIII + catalisador cristalino				
Traço 2 cimento CPIII				
Traço 3 cimento CPII-E + catalisador cristalino				
Traço 4 cimento CPII-E				

2.2. Recuperação da resistência á compressão

Aos 28 dias de idade, uma carga de compressão uniaxial foi aplicada para gerar microfissuras no concreto, onde os corpos-de-prova cilíndricos foram pré-carregados por 2 minutos até 90% da carga máxima de ruptura à compressão. A extensão do dano foi determinada como uma porcentagem da perda de propriedades mecânicas e um percentual de aumento nas propriedades de permeabilidade que foram monitorados durante 28 e 56 dias adicionais necessários para a autocicatrização destas microfissuras. Os resultados da recuperação de resistência foram atribuídos à autocicatrização destas microfissuras pré-existentis, devido à hidratação latente das partículas anidras do cimento e principalmente pelo efeito ativador do catalisador cristalino sobre as superfícies destas microfissuras como apresentados no Gráfico 1.

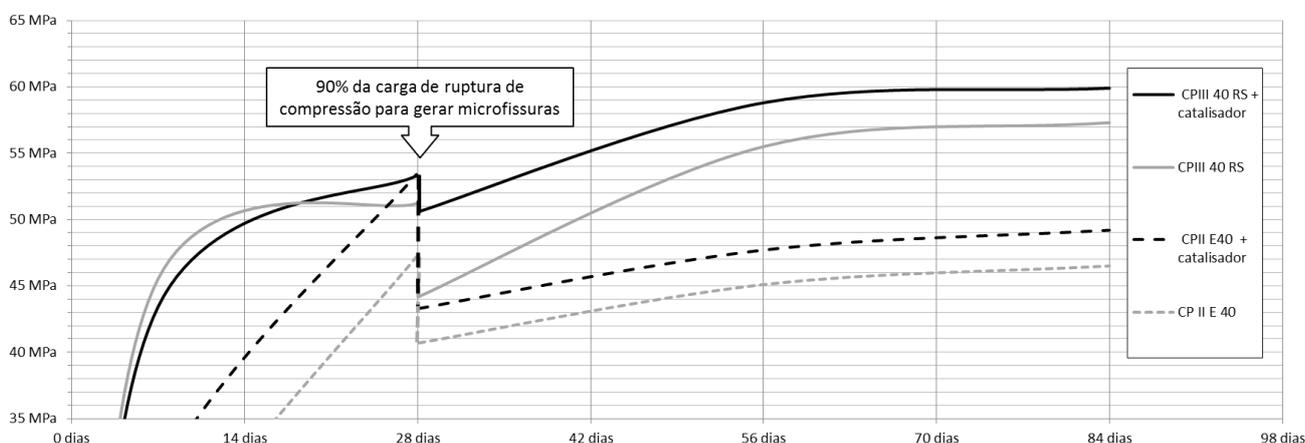


Gráfico 1 – Perda da resistência à compressão e recuperação devido ao efeito autocicatrizante das microfissuras

Os resultados da recuperação da resistência à compressão será atribuída ao efeito de autocicatrização das microfissuras existentes geradas no pré-carregamento, devido à hidratação das partículas anidras de cimento, especialmente pelo efeito da ativação pelos catalisadores cristalinos, nas superfícies destas microfissuras. A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas dos corpos-de-prova de concreto com idades de 14 dias, 28 dias antes e imediatamente após o pré-carregamento, 56 dias e 84 dias.

Tabela 3. Propriedades da Resistência à Compressão do concreto (MPa)

Traço	Resistência à compressão (MPa)					Perda (%)	Recuperação (%)
	14dias	28 dias antes	28 dias depois	56 dias	84 dias		
1	43,5	53,3	50,6	58,8	59,9	5,1	17,4
2	45,6	51,2	44,2	55,5	57,3	13,7	25,6
3	30,2	53,4	43,3	47,7	49,2	18,9	11,0
4	22,9	47,2	40,7	45,1	46,5	13,8	12,3
Traço 1 cimento CPIII + catalisador cristalino							
Traço 2 cimento CPIII							
Traço 3 cimento CPII-E + catalisador cristalino							
Traço 4 cimento CPII-E							

2.3. Taxa de absorção de água dos corpos-de-prova

A taxa de absorção (mm^3/mm^2), definida como a variação da massa (g) pela seção transversal da amostra (mm^2) e a densidade da água, em função da raiz quadrada do tempo ($\text{segundos}^{1/2}$). As linhas de inclinação obtidas definem as taxas de absorção de água durante as primeiras seis horas dos corpos-de-prova virgens e fissurados/cicatrizados no Gráfico 2 e apresentado na Tabela 4.

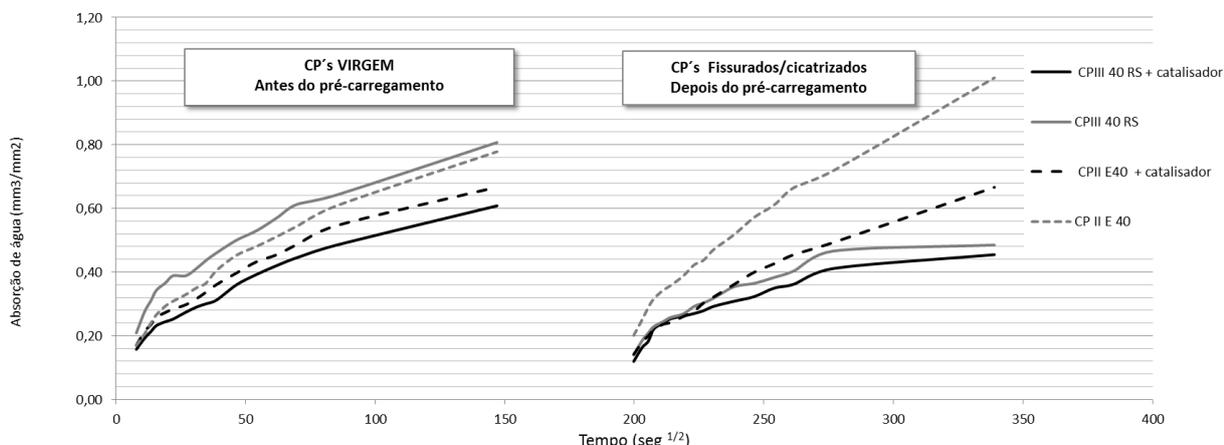


Gráfico 2 – Comparação da taxa de absorção de água dos corpos-de-prova Virgens e Fissurados/cicatrizados

O teste de absorção apesar de ser razoavelmente fácil de executar, é de grande interesse para o fenômeno de autocicatrização das fissuras. As amostras deverão ser secas em uma solução de brometo de potássio a 50 °C por três dias, para que os cristais formados não sejam danificados.

Tabela 4. Taxa de absorção de água dos corpos-de-prova

CP's	Cimento C-III		Cimento C-II-E	
	+ catalisador		+catalisador	
	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
VIRGENS				
60	0.158	0.209	0.171	0.170
120	0.193	0.276	0.214	0.206
180	0.214	0.311	0.236	0.241
240	0.232	0.343	0.259	0.266
360	0.245	0.366	0.274	0.294
480	0.253	0.389	0.284	0.309
720	0.274	0.389	0.298	0.330
960	0.291	0.412	0.317	0.351
1200	0.301	0.437	0.337	0.366
1500	0.313	0.461	0.361	0.406
2160	0.361	0.501	0.398	0.454
2940	0.393	0.531	0.433	0.481
3840	0.421	0.571	0.455	0.512
4860	0.446	0.613	0.487	0.544
7200	0.485	0.642	0.546	0.608
21600	0.609	0.807	0.667	0.778
CP's	Cimento C-III		Cimento C-II-E	
Fissurados / Cicatrizados	+ catalisador		+catalisador	
	Traço 1	Traço 2	Traço 3	Traço 4
60	0.120	0.141	0.142	0.202
120	0.163	0.185	0.180	0.250
180	0.184	0.209	0.200	0.290
240	0.222	0.229	0.219	0.316
360	0.240	0.244	0.236	0.342
480	0.254	0.258	0.242	0.358
720	0.262	0.269	0.261	0.388
960	0.270	0.292	0.277	0.422
1200	0.279	0.303	0.303	0.437
1500	0.293	0.319	0.323	0.472
2160	0.309	0.354	0.362	0.518
2940	0.323	0.365	0.400	0.572
3840	0.350	0.384	0.427	0.611
4860	0.363	0.405	0.456	0.666
7200	0.412	0.467	0.494	0.719
21600	0.455	0.485	0.667	1.010
	Traço 1	cimento C-III + catalisador cristalino		
	Traço 2	cimento C-III		
	Traço 3	cimento C-II-E + catalisador cristalino		
	Traço 4	cimento C-II-E		

2.4. Resultados e discussão

O método convencional de reparo de elementos de concreto fissurados que tem sido adotado até o presente momento tem sido bloquear fisicamente a água através da aplicação de um revestimento impermeabilizante flexível com habilidades de cobrimento de fissuras (crack bridging), ou a injeção das fissuras com resinas flexíveis de baixa viscosidade, que consiste principalmente de substâncias orgânicas a base de poliuretano ou gel de acrílico. Em contraste, este artigo apresenta um sistema complementar que visa diminuir a permeabilidade da estrutura de concreto com a cicatrização das porosidades e fissuras de até 0,4 mm pela aplicação de um catalisador cristalino no momento da dosagem do concreto, e que provoca a formação de novos cristais de cimento no interior da matriz de concreto, bem como na superfície das fissuras do concreto, mesmo em uma estrutura com carregamento dinâmico (Mori, Kuramoto, Takagi, Horie, & Tanimoto, 1996).

O pré-carregamento do concreto provocou um aumento da porosidade total e uma perda em sua resistência máxima de compressão. Com o desenvolvimento das microfissuras para dentro da microestrutura do concreto, a estrutura de poros foi modificada e a continuidade das fissuras foi aumentada. Inicialmente a redução da resistência à compressão foi de cerca de 5,1% ~ 18,9%, quando pré-carregado até 90% da resistência de ruptura à compressão. Após 56 dias, sua recuperação foi de cerca de 11,0% ~ 25,6%. Observou-se uma recuperação de 99% em relação aos espécimes virgem aos 28 dias dos corpos-de-prova com cimento CII-E ativado com os catalisadores cristalinos, e os corpos-de-prova sem os catalisadores foi de 92%. Observação semelhante também podem ser feitas nos corpos-de-prova com cimento CIII onde a recuperação dos corpos-de-prova com e sem adição dos catalisadores foi de 112% em relação aos espécimes virgem de 28 dias. Isto pode ser explicado que devido ao fato de que grandes volumes de materiais pozolânicos, possuem uma quantidade importante de partículas não hidratadas disponível em sua microestruturas, e estas observações são atribuídas ao efeito de autocicatrizante da fissura preexistente ativadas pelos catalisadores cristalinos. As recuperações da resistência à compressão e propriedades de permeabilidade podem estar relacionado com o preenchimento progressivo da fissura por-novos géis de C-S-H formados devido aos efeitos autocicatrizante (Sahmaran, Keskin, Ozerkan, & Yaman, 2008).

2.5. Conclusões do programa experimental em laboratório

A partir deste programa experimental em laboratório ficou claro que o catalisador cristalino foi eficaz em melhorar a durabilidade do concreto de alto desempenho submetido a carregamentos mecânicos contínuos ou repetitivos, e, portanto, resultados de uma melhor resistência à compressão e impermeabilização, e também contribuiu para uma melhor compreensão dos fenômenos de autocicatrização.

Visando um estudo de traço com a tecnologia de autocicatrização robusta otimizada para concretos de alto desempenho, recomenda-se o uso do cimento de escória de alto-forno do tipo (25% < teor de escória < 70%) com adição de catalisadores cristalinos e fibras dúcteis de fibra de vidro.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL EM CAMPO

O conhecimento desenvolvido neste artigo possibilitou que esta tecnologia de autocicatrização pudesse ser observada em uma área teste de 80 m² deste concreto autocicatrizante projetado em túnel, visando dar subsídios para serem utilizadas em especificações nos sistemas de impermeabilização de estruturas subterrâneas submetidos à exposição contínua de água.

3.1. Sistemas Impermeabilização de Túneis

Os Sistemas de Impermeabilização de túneis são um conjunto de elementos e processos empregados para prover a estanqueidade das estruturas subterrâneas, onde os elementos e processos podem ser empregados agrupados ou isoladamente conforme o tipo de maciço, a quantidade de água, o método construtivo empregado e o desempenho especificado para a obra, e são classificados como a seguir:

- Tipo 1 - Concreto moldado in loco ou projetado autocicatrizante aditivada com catalisadores cristalinos;
- Tipo 2 - Geomembrana termoplástica de PVC-P;
- Tipo 3 - Perfil extrudado de PVC para juntas de concretagem e compartimentação das estruturas de concreto;
- Tipo 4 - Injeção de vazios e DHP com caldas de microcimento;
- Tipo 5 - Injeção de fissuras definidas com resinas de poliuretano;
- Tipo 6 - Injeção de fissuras e vazios com resinas à base de géis de acrílico polimérico.

3.2. Maciço rochoso

Considerar a necessidade de drenagem provisória de maciço rochoso ou do revestimento primário com um sistema de condução de águas infiltradas através de instalação sistemática de mantas drenantes aplicados em forma de espinha de peixe do tipo “Sistema Oberhasli”, que deve ter capacidade e durabilidade para coletar e conduzir todas as águas infiltradas, permitindo uma superfície seca para os serviços posteriores.

Prever a utilização de calda de microcimento para preenchimento de vazios que pode ser empregado entre o revestimento primário e o solo escavado, ou o preenchimento de drenos instalados no solo (DHP).

Inserts metálicos e cabeças de tirante de ancoragem “rock bolt” devem ser cortadas, e posteriormente as superfícies de corte devem ser protegidas para evitar prejudicar o sistema de estanqueidade. A superfície deverá estar regularizada com argamassa industrializada conforme exigência do fabricante do sistema de impermeabilização.

3.3. Localização dos tratamentos

O tratamento de impermeabilização e proteção química está previsto para as seguintes localizações, dependendo do perfil hidrogeológico do terreno escavado:

Perfil hidrogeológico		Camada de contenção 1ª fase	Pré-tratamento	Sistema impermeabilizante	Camada definitiva de 2ª fase	Pós-tratamento
túneis de grande cobertura em rocha sã	infiltrações localizadas	Concreto projetado	Cristalização localizada	Concreto autocicatrizante projetado c/ fibras de vidro		Injeção de resinas de gel de acrílico
	afluxo de água localizada	Concreto projetado	Injeção química	Membrana projetável MC-APC	Concreto moldado ou projetado autocicatrizante	Injeção de resinas de gel de acrílico
	com fluxos de água ativos	Concreto projetado	Injeção química	Geomembrana de PVC	Concreto autocicatrizante moldado ou projetado	Injeção de resinas de gel de acrílico
túneis de baixa cobertura em solo ou rocha alterada	com grande fluxos de água ativos	Concreto projetado c/ fibra de aço	Injeção química	Geomembrana de PVC e compartimentação com juntas de PVC	Concreto moldado ou projetado autocicatrizante	Injeção de resinas de poliuretano ou géis de acrílico
túneis em shield	com grande fluxos de água ativos e carreamento de areia		Injeção química em cortina	Segmentos de concreto moldado autocicatrizante c/ vedajuntas		Injeção de resinas de géis de acrílico
túneis de baixa cobertura em areia	com grande fluxos de água ativos e carreamento de areia	Concreto autocicatrizante projetado c/ fibras de aço	Injeção em cortina e injeção química	Geomembrana de PVC e compartimentação com juntas de PVC	Concreto moldado ou projetado autocicatrizante	Injeção de resinas de poliuretano ou géis de acrílico

3.4. RELATÓRIO FOTOGRÁFICO

A relevância deste artigo é apresentar o desenvolvimento do estado-da-arte da tecnologia de concreto autocicatrizantes, baseada em pesquisas teóricas e experimentais em laboratório e em campo, de modo que estabelecer quais devam ser os parâmetros para o estudo de traços de concretos de concretos autocicatrizantes de alto desempenho. Este relatório fotográfico abrange o período de 05 de Novembro de 2011 até a data de 17 de Dezembro de 2011.



Foto 1 - Condições hidrogeológicas da área teste em 05.01.2011, com drenos provisórios para captação das infiltrações.



Foto 2 – Aspecto geral da área teste de 80 m² delimitados pelas riscas brancas em 17.12.2011

4. CONCLUSÕES

Atualmente, existe uma grande quantidade de materiais e produtos que os fabricantes da indústria química de construção se encarregam de lançar ano após ano. Diante dessa realidade, fica claro que a consolidação de parâmetros, critérios e metodologias de escolha desses novos produtos é imprescindível.

A metodologia apresentada neste artigo para a escolha de produtos procura fornecer uma base sólida e técnica para julgamento da compatibilidade de produtos destinados a este fim. A metodologia preenche um vazio existente na bibliografia nacional sobre ensaios de comportamento dos materiais cimentícios com capacidade autocicatrizante. A partir dos resultados obtidos nestes programas experimentais e com a continuação dos estudos através da realização de novos experimentos será possível obter parâmetros quantitativos para uma melhor avaliação dos sistemas de impermeabilizações de túneis encontrados no mercado nacional.

Agradecimentos

A MC-Bauchemie Brasil pelo apoio a este programa de pesquisa de pós-graduação desenvolvido no ITA - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, e ao Dr. Pat McGrath da Xypex Chemical Corporation pelos conselhos fornecidos para execução dos ensaios.

5. BIBLIOGRAFIA

- Ahn, T.-h., & Kishi, T. (Junho de 2010). Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various minerals admixtures. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 8, No 2, pp. 171-186.
- Edvardsen, C. (Julho-Agosto de 1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, pp. 448-455.
- Hearn, N. (Outubro de 1998). Self-healing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? *Materials and Structures*, Vol. 31, pp. 563-567.
- Mori, S., Kuramoto, Y., Takagi, E. M., Horie, M., & Tanimoto, S. (1996). Repairing of heavily cracked reinforced concrete bridge deck slab from underside. *51st Annual Meeting of Civil Engineering Society of Japan*, (pp. 344-345). Tokyo.
- RILEM. (2005). *Self-healing phenomena in cement-based materials*. Acesso em 25 de Janeiro de 2012, disponível em Technical Committee 221-SHC: http://www.rilem.net/gene/main.php?base=8750&gp_id=228
- Sahmaran, M., Keskin, S. B., Ozerkan, G., & Yaman, I. (10 de Julho de 2008). Self-healing of mechanically-loaded self-consolidating concretes with high volumes of fly-ash. *Cement and Concrete Composites* 30, pp. 872-879.
- Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (7 de Abril de 2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and Concrete Composites* 33, pp. 763-770.