



## **GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

### **ELETRO MIGRAÇÃO DE NANO SÍLICA PARA RECUPERAÇÃO DE CONCRETO ENVELHECIDO**

**PIERRE TEIXEIRA RODRIGUES(1);LEOPOLDO ROCCO JUNIOR(2);BRUNO ROCCO(2);MARCELA G. DOMMINGUES(3);JOSÉ ROCCO(2)  
JORDÃO ENERGIA(1);FLOWTEST(2);SUPER NOVA SOLUÇÕES INOVADORAS(3)**

#### **RESUMO**

Técnica de transporte de material recuperador (nano sílica) pela instalação de campos elétricos, num conceito de eletroquímica, promovendo a migração da nano sílica em meio aquoso para o interior de amostras de concreto envelhecido e posterior reação com o hidróxido de cálcio, principal subproduto da descarbonatação da matriz cimentícia. Estudos confirmaram o êxito desta técnica, pois foi possível identificar o processo de migração da nano sílica sob o efeito do campo elétrico. Projeta-se a aplicação deste processo em campo, onde grandes áreas de concreto deverão ser recuperadas. Para isso será utilizada a técnica de difusão induzida, em substituição ao processo eletroquímico.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Matriz Cimentícia, Nano Sílica, Recuperação de Concreto Envelhecido, Campo elétrico, Eletroquímica

#### **1.0 INTRODUÇÃO**

De um modo geral, houve uma grande evolução na tecnologia do concreto, e de formas de recuperação de sua matriz, nestas últimas décadas. No entanto, o concreto ainda tem apresentado sérios problemas de durabilidade, sendo despendidos, anualmente, grandes somas de dinheiro na manutenção no reparo e na reabilitação das estruturas de concreto. Isto ocorre, na maioria das vezes, em virtude de falhas cometidas no projeto das estruturas, na especificação dos materiais e nos procedimentos executivos. Muitas são as tecnologias empregadas nestas operações de reparo e reabilitação do concreto "envelhecido". Em 2018, no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, deu-se início a uma pesquisa aplicada onde empregou-se eletroquímica para transportar partículas de nano sílica em meio aquoso para o interior de amostras de concreto envelhecido e posterior reação da nano sílica com o hidróxido de cálcio, principal subproduto da descarbonatação da matriz cimentícia. Estudos preliminares, onde se pesquisou sobre o mecanismo de eletro migração da nano sílica, apontaram para o êxito desta técnica, já que, em escala laboratorial, foi possível identificar o processo de migração da nano sílica sob o efeito do campo elétrico.

Assim, projeta-se a aplicação deste processo de recuperação para as condições de campo, onde grandes áreas de concreto deverão ser recuperadas pela reação entre a nano sílica e o hidróxido de cálcio produto do envelhecimento da matriz cimentícia. A nano sílica reage rapidamente com o hidróxido de cálcio liberado durante pós-hidratação do cimento (envelhecimento) produzindo compostos mineralógicos similares à matriz cimentícia original, mais concretamente gel de CSH. A diferença do gel de CSH de origem cimentícia é que a fonte de origem da nano sílica apresenta baixa densidade de defeitos e, consequentemente, ótimas propriedades mecânicas. No concreto fresco, quando a nano sílica é incorporada a um aditivo orgânico, elimina as dificuldades de manipulação e homogeneização promovendo melhor desempenho dos concretos (SILICON, 2014). No concreto degradado, ou envelhecido, a nano sílica age de forma similar. O contato do cimento Portland com a água (hidratação) desencadeia uma série de processos reativos que levam aos produtos hidratados resultando em uma densa e estável microestrutura. Mais recentemente, empregam-se polímeros que interagem com os principais elementos do cimento Portland como, silicatos e aluminatos, durante a reação de hidratação, que é de grande importância no estudo de sua resistência à degradação. Há no mercado produtos que atuam de forma parcialmente similar. Porém, a sinergia entre a ação da nano sílica e dos polímeros base água pode representar um ganho de desempenho na recuperação do concreto. Desta forma, esta solução visa agregar efeitos distintos à metodologia já desenvolvida em estudo prévio. Alcançando a fase de cabeça de série, o sistema desenvolvido está a caminho de atender as condições de campo de uma UHE - Usina Hidroelétrica cujas estruturas apresentam sinais de "envelhecimento" acelerado em posições pontuais das estruturas. Para isso está sendo desenvolvida a técnica de difusão induzida, onde os pesquisadores poderão aplicar a solução em grandes áreas de estruturas de concreto, fundamentalmente em trechos de barragens envelhecidas de UHEs. Esta solução, que desde a fase de laboratório se mostrou muito promissora, tem um enorme potencial para

resolver, de forma simples, um problema clássico do setor elétrico. De forma complementar, é importante ressaltar que este desenvolvimento tem proporcionado capacitações tecnológicas e profissionais ao longo de seu desenvolvimento.

## 2.0 DETALHAMENTO DA ORIGINALIDADE

Nos últimos anos, o uso de nanopartículas tem recebido atenção especial em muitos campos de aplicação com o propósito de produzir materiais com novas funcionalidades. No caso dos materiais a base de cimento (cimento/concreto fresco), as partículas de sílica de tamanho nanométrico, chamadas de nano sílica (NS), podem favorecer um aumento na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) através das reações pozolânicas com o hidróxido de cálcio. Como resultado, uma maior densificação da matriz de cimento tende a ser obtida e, por conseguinte, uma maior resistência e durabilidade de pastas, argamassas ou concretos. Vários autores estudaram a influência da nano-SiO<sub>2</sub> em propriedades como resistência à compressão ou flexão, índice de consistência, calor de hidratação, tempo de pega, além da microestrutura. Neste projeto de P&D, o mesmo conceito foi empregado na recuperação da matriz cimentícia (concreto envelhecido) exposto à ação do tempo e intempéries, incluindo exposição à umidade e contaminantes ambientais.

Quando nano materiais são utilizados na pasta de cimento fresco, há uma tendência a aglomeração das nanopartículas. Na prática, as partículas de cimento podem formar torrões antes e durante a produção da pasta. De acordo com YAZDANBAKHSH e GRASLEY (2012), o tamanho dos torrões pode atingir centenas de micrômetros, causando também o agrupamento das nanopartículas. O tamanho das partículas do cimento não é o único fator que influencia na dispersão das nano inclusões, mas também do percentual utilizado. Normalmente, a dispersão de nano inclusões é mais difícil de ser obtida em relação aos materiais de maior tamanho de partícula. O concreto é formado por materiais de diversos tamanhos, proporções, e também porosidade, comportando-se como um meio não contínuo, sendo, portanto, a inclusão de nano partículas nesse material mais complexa (YAZDANBAKHSH e GRASLEY, 2012). Desta forma, materiais com características dispersantes, quando incorporados ao concreto, permitem a melhoria de suas propriedades gerais tais como: comportamento mecânico, porosidade, dentre outros.

À medida que a estrutura de concreto envelhece, a ação do tempo e das intempéries tendem a modificar as características originais da matriz cimentícia, tornando-a porosa e comprometida em termos de resistência mecânica e física. Por sua alta porosidade, é sujeita a todo tipo de ataque, inclusive químico, pela ação na armadura que deixa de ter a proteção de um meio alcalino apassivador. Surge prioritariamente o processo de corrosão galvânica, resultando da necessidade de se refazer a matriz cimentícia, foco principal deste projeto de P&D. A nano sílica é capaz de refazer esta matriz cimentícia danificada. Porém, a forma de levá-la ao interior das peças danificadas deve ser original. Sendo assim, foi proposto um processo eletroquímico denominado eletro migração. Esta técnica é nova e vem sendo pesquisada pela comunidade científica em algumas partes do planeta. Há alguns relatos de sucesso neste método que estão referenciados na revisão bibliográfica deste relatório. No entanto, como toda técnica em desenvolvimento/estado da arte, havia a necessidade de comprovação e adaptação para casos específicos como o das barragens que estão sujeitas, principalmente, a um processo de percolação contínua. Essa água de percolação lixívia o concreto, destruindo sua matriz cimentícia ao longo do tempo.

## 3.0 TESTES DE FUNCIONALIDADE

Foram empregados testes de funcionalidade da eficiência, tanto do transporte como da reação da nano sílica com o hidróxido de cálcio, do método originalmente proposto. As técnicas empregadas permitiram verificar que a nano sílica emulsionada no banho eletrolítico se desloca sob a ação de um campo elétrico pela aplicação da DDP de 12 Volts, indo do polo negativo para o positivo. O uso do microscópio eletrônico permitiu observar a presença da nano sílica no interior dos corpos de prova de concreto ensaiados experimentalmente. Os primeiros ensaios empregando a técnica de microscopia de varredura eletrônica - MEV, apesar de terem sido inconclusivos, mostraram a necessidade de usar outras técnicas de análises para verificação dos resultados. Em vista disto, amostras do concreto tratado pela nano sílica foram submetidas, não apenas a novos ensaios de MEV, como também, de Difração de Raios X.

Além destes testes, a equipe de pesquisadores também utilizou amostras de concreto vindas da PCH Passo do Meio da ELERA RENOVÁVEIS, objetivando testar a tecnologia em uma peça real de concreto utilizado nas hidrelétricas.

As amostras foram extraídas da PCH de Passo do Meio, localizada no município de São Francisco de Paula, Rio Grande do Sul. A realização dos ensaios com amostras retiradas da barragem é de extrema importância, pois possibilita que a metodologia proposta seja aplicada nas reais condições de trabalho e de exposição do concreto, ainda que a instalação de um processo eletroquímico de recuperação no campo esteja sendo concebido de forma diferenciada àquela desenvolvida em escala laboratorial. Ressalta-se, ainda, que estas amostras se diferem, em sua composição de traço de concreto, daquelas empregadas nos demais ensaios pois observou-se uma densidade típica de traço empregado em barragens. Além disto, segundo o ACI – American Concrete Institute, o concreto raramente é atacado por substâncias sólidas e secas. Para produzir ataque significativo ao concreto, as substâncias agressivas têm que estar em solução e acima de uma determinada concentração mínima. Quando tais soluções se apresentam sob pressão de um dos lados da estrutura, como é o caso das barragens, esta fica mais vulnerável ao ataque, já que a pressão tende a forçar os agentes agressivos para o interior do concreto. Pelo acima exposto, prevê-se que a

eletro-extração tenha uma ação mais significativa nos CDPs (Corpos de Prova) das amostras da barragem do que no concreto convencional anteriormente ensaiado.

Na Figura 1 estão as 7 (sete) amostras recebidas no mês de janeiro de 2020 e que foram submetidas aos ensaios de recuperação pelo processo de eletro migração da nano sílica.



Figura 1. Amostras de concreto envelhecido extraídas da PCH de Passo do Meio, RS.

A partir destas amostras, foram retirados alguns corpos de prova a fim de que fossem submetidos ao processo de eletro migração da nano sílica com vistas a promover a recuperação de sua matriz cimentícia e, conseqüentemente, aumentar a resistência mecânica destas peças. Na Figura 2 está a preparação dos CDPs produzidos por uma máquina de corte desenhada para o concreto.



Figura 2. Preparo dos corpos de prova de concreto envelhecido empregando serra mármore circular.

Os ensaios com as amostras extraídas da PCH seguiram o padrão dos primeiros ensaios realizados neste Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento, onde foram preparadas duas semi-cubas, uma contendo água deionizada e, outra, contendo água deionizada saturada com nano sílica. O corpo de prova foi posicionado de modo a separar estas duas semi-cubas, ficando, cada uma de suas faces, expostas as diferentes soluções. Este arranjo experimental está apresentado na Figura 3 a seguir.

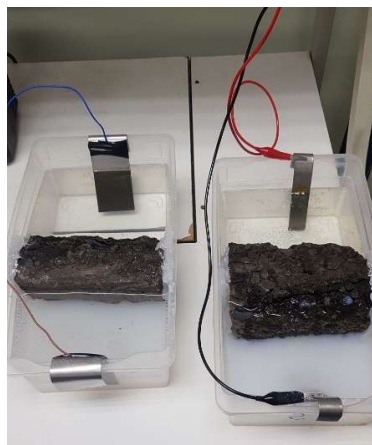


Figura 3. Aparato experimental para realização do processo de eletro migração da nano sílica com as amostras de concreto extraídas da PCH de Passo do Meio, RS.

Durante os ensaios com as amostras da PCH de Passo do Meio, observou-se a ocorrência do processo de eletromigração da nano sílica, o que indica que a metodologia proposta é aplicável, em escala laboratorial, às condições reais de campo.

#### 4.0 CONCLUSÕES

Foi possível comprovar, em escala laboratorial, a aplicação de conceitos de eletroquímica no processo de transporte e ação recuperadora da sílica (nanoparticulada) na reconstrução da matriz cimentícia de amostras de concreto envelhecidas por exposição ao tempo e condições ambientais locais destas mesmas estruturas. O arranjo experimental (escala laboratorial) proposto, na forma de semi-cubas eletrolíticas, propiciou o transporte da nano sílica em direção as amostras de concreto a serem tratadas. Também foi elucidado, através dos ensaios de espalhamento de raio X, o mecanismo de recuperação da matriz cimentícia onde o  $\text{Ca(OH)}_2$ , produto da degradação da matriz, reage com a sílica nanoparticulada, produzindo um tipo específico de CSH onde predomina o silicato de cálcio, um dos principais elementos da hidratação do cimento Portland.

A ação do campo elétrico, promovido pela aplicação da DDP – diferença de potencial elétrico, também pôde ser simulado através do software LAMMPS, onde as linhas de campo determinaram a movimentação da nanosílica na solução aquosa da semi-cuba saturada. Neste caso, a nano sílica produz uma emulsão com carga elétrica que reage ao campo elétrico resultando na sua movimentação, inclusive, tendo sido comprovada pela observação visual do interior das amostras de concreto que foram seccionadas.

Como resultado paralelo ao processo eletroquímico, foi também observada a ocorrência da eletroextração de contaminantes ambientais, principalmente o cloro, do interior das mesmas peças de concreto submetidas ao tratamento de recuperação por eletro migração da nano sílica.

Dos diversos arranjos experimentais, aquele onde a corpo de prova atua como interface entre uma semi cuba contendo nano sílica dispersa em água desmineralizada e, outra, contendo apenas água desmineralizada se mostrou a mais eficaz no tratamento proposto, já que este arranjo possibilita que os processos de recuperação do concreto e de eletroextração ocorram simultaneamente.

Vislumbrando soluções de campo, o processo de eletro migração foi substituído por um processo de difusão da nano sílica que deverá estar dispersa em um meio aquoso, tendendo a uma aplicação na forma de uma tinta base água. Esta solução já vem sendo testada em um novo projeto de P&D em andamento.

O processo de difusão induzida está baseado na característica de permeabilidade do concreto e suas leis físicas que permitem a migração (transporte) de materiais de diferentes concentrações em meio aquoso. No caso, da solução concentrada de nano sílica aplicada na superfície da peça de concreto a ser tratada.

#### 5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Brown, M.E. Introduction to Thermal Analysis. Techniques and Applications. Chapman and Hall. London, 1988.
- (2) Canevarolo, S.V. Ciência dos Polímeros. Ed. Artiber, São Paulo, 2002.

- (3) Canevarolo, S.V. Técnicas de caracterização de polímeros, Ed. Artliber, São Paulo, 2003.
- (4) Houst, Y. F., Wittmann, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation, *Cement and Concrete Research* 32, 2002, pp. 1923-1930.
- (5) Pauletti, C., Possan, E., Dal Molin, D. C. C. Carbonatação acelerada: estudo da arte das pesquisas no Brasil, *Ambiente Construído* 7, 2007, pp. 7-20.
- (6) Possan, E. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto, 2010.
- (7) Souza, V.; Ripper, T. Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto. – São Paulo: Pini, 1998.
- (8) Takagi, E. M.; Junior, A. W. Utilização de tecnologias de injeção para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado. Disponível em Acesso em 10 abr. 2014.
- (9) Talukdar, S., Banthia, N., Grace, J. R. Carbonation in concrete infrastructure in the context of global climate change - Part 1: Experimental results and model development, *Cement and Concrete Composites* 34, 2012, pp. 924-930.
- (10) Turi, E.A. Thermal Characterization of Polymeric Materials, Academic Press, San Diego, 1997.
- (11) Villain, G.; Thiery, M.; Platret, G. Thermogravimetry, chemical analysis and gammadensimetry. *Cement and Concrete Research*, 37, 2007, p. 1182–1192.
- (12) Zhang, Q.; Ye, g. Dehydration kinetics of Portland cement paste at high temperature. *J Therm Anal Calorim* 110, 2012, pp. 153–158.

## 6.0 DADOS BIOGRÁFICOS



Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense e Mestrando em Administração pelo IBMEC-RJ, na área de Estratégia Empresarial e Desenvolvimento de Negócios. Vinte e cinco anos de experiência desenvolvendo projetos em eficiência energética, autor de publicações no tema eficiência energética, gerenciamento e desenvolvimento de mais de 250 projetos de pesquisa e desenvolvimento no Programa da ANEEL, gerenciamento e execução de projetos sobre fontes renováveis de energia elétrica e coordenação de ações relacionadas a inserção no mercado de produtos desenvolvidos em projetos de pesquisa. Espírito empreendedor, dinamismo, histórico de sucesso no desenvolvimento e gestão de projetos ligados ao setor.

### (2) LEOPOLDO ROCCO JUNIOR

Graduado em engenharia mecânica pela Fundação Armando Álvares Penteado (FAAP) (1983), administração de empresas pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (1990), mestrado (2006 - injetores de propelentes para foguetes) e doutorado (2013 - propulsão motor foguete híbrido), ambos em engenharia aeronáutica e mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. Grupos de pesquisa (CNPq): - Ciência e Tecnologia Aeroespacial - Materiais energéticos - Projetos, fabricação e processos de materiais estratégicos da Área de Defesa - Propulsão Química. Gestor da empresa Flowtest Engenharia e Pesquisa Ltda. voltada para pesquisa, inovação e desenvolvimento (P&D). Na Bertel Indústria Metalúrgica Ltda. trabalha nas áreas comercial, qualidade (ISO 9001-2008) e segurança do trabalho.

### (3) BRUNO ROCCO

Engenheiro e pesquisador altamente motivados por qualidade, foco e solução. Desenvolvendo soluções para projetos de P&D químicos, mecânicos e elétricos. Conhecimento em uma variedade de simulações como CFD, CAD, química e mecânica e posteriormente aplicado em escala laboratorial ou industrial. Engenheiro de Controle e Automação do Instituto Mauá de Tecnologia. Pesquisador na Flowtest Engenharia e Pesquisa (área de energia e seus processos, envolvendo materiais químicos). Mestre pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica em Ciências e Tecnologias Aeroespaciais com automatização de motores de foguetes híbridos.

### (4) MARCELA G. DOMMINGUES

Doutora pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Espacial, na área de Química dos Materiais pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Mestre em Geografia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Graduação em Geografia pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Atualmente, participa como pesquisadora de projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) vinculados à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) nas áreas de revestimentos protetivos, materiais ablativos empregados no setor

aeroespacial e setor de geração e distribuição de energia elétrica, lubrificantes de alto desempenho e materiais e processos aplicáveis ao setor de construção civil.

(5) JOSÉ ROCCO

Engenheiro químico com doutorado em físico-química atuando na área de ensino e pesquisa. Desenvolve pesquisas devotadas a área de tintas e revestimentos, lubrificantes especiais, defesa e aeroespacial.