APLICAÇÃO DE REGRESSÃO POLINOMIAL EM AUXÍLIO À MENSURAÇÃO DE PERDA DE MASSA DE ESTRUTURA DE CONCRETO DEVIDO À LIXIVIAÇÃO

T. OLIVEIRA
Engenheira Civil
Universidade Federal do Pará
Tucuruí/Pará; Brasil
thaisvaladares.94@gmail.com

A. NOGUEIRA
Engenheiro Civil
Eletrobras Eletronorte
Tucuruí/Pará; Brasil
andre.nogueira@eletronorte.gov.br

RESUMO

A regressão é uma ferramenta estatística utilizada com o intuito de relacionar variáveis, definindo o grau de correlação entre elas. Seu uso pode beneficiar diversas análises, ao fornecer equações que regem um comportamento. A lixiviação, por sua vez, é um processo deteriorativo capaz de fragilizar estruturas de concreto, ampliando sua porosidade e, por consequência, reduzindo sua resistência e durabilidade. Com o intuito de mensurar, em um ano, a perda de massa desencadeada em uma estrutura devido à lixiviação, realizou-se um estudo de caso em uma das estruturas componentes da barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí). Duas ações foram tomadas a princípio: coletar periodicamente, para análise química, amostras da água do reservatório da barragem e dos drenos que deságuam no interior da galeria; e medir a vazão destes drenos. Durante o período de coleta de amostras, se ocorrem falhas, dados importantes tornam-se omissos e, para sanar sua ausência, a regressão se torna essencial. Este trabalho, então, objetiva demonstrar a validade da aplicação da regressão polinomial em auxílio a esta mensuração, ao passo que se trata de um excelente instrumento para o preenchimento de dados faltantes. Foram utilizadas enquanto variáveis independentes a cota do reservatório e a vazão de cada dreno e como variável dependente a concentração de cálcio nas amostras. Notou-se, com esta pesquisa, que o uso da regressão polinomial tornou o cálculo da perda de massa mais verossímil.
Palavras-chave: Lixiviação. Concreto. Perda de massa. Regressão polinomial.

ABSTRACT

Regression is a statistical tool used to relate variables, defining the degree of correlation between them. Its use can benefit various analyzes, by providing equations that govern a behavior. Leaching, on the other hand, is a deteriorating process capable of weakening concrete structures, expanding its porosity and, consequently, reducing its strength and durability. In order to measure, within a year, the loss of mass in a structure due to leaching, a case study in one of the dam structures of Hydroelectric Power Plant of Tucuruí (HPP Tucuruí) was performed. At first, two actions were taken: periodically collect, for chemical analysis, of water samples from the dam reservoir and from the drains within the drainage gallery; and measure the water flow of these drains. During sample collecting period, if failures occur, important data are omitted and, to remedy its absence, regression becomes essential. This paper, then, aims to demonstrate the validity of the application of polynomial regression to aid to the measurement, as it is an excellent tool for filling missing data. It was used as independent variables the water level of the reservoir and each drain water flow and as dependent variable the concentration of calcium in the samples. It was noted, with this research, that the use of polynomial regression made the calculation of loss of mass more plausible.
Keywords: Leaching. Concrete. Loss of mass. Polynomial regression.

1. INTRODUÇÃO

A lixiviação é um fenômeno patológico capaz de acometer elementos de concreto, desencadeado pela percolação de água através destes. A matriz cimentícia, a qual envolve os agregados que compõem este material, possui diversos produtos constituídos por cálcio, os quais têm diferentes graus de solubilidade e são, portanto, suscetíveis a dissolução, especialmente na presença de águas pouco dotadas destes íons

em sua solução. A partir deste processo, o concreto perde paulatinamente massa, ampliando sua porosidade, bem como sua permeabilidade.

Fenômenos que envolvem reações de difusão, como é o caso da lixiviação, são mais passíveis de ocorrência quando o concreto se encontra exposto a águas pobremente mineralizadas ou ácidas. A lixiviação de compostos de cálcio e silício presentes na matriz cimentícia é característica da deterioração do concreto por contato com soluções agressivas deste tipo, sendo esta reação uma das que mais afetam a durabilidade de pastas de cimento (SICAKOVA; ESTOKOVA, 2014).

Ainda que a lixiviação amplie o sistema de poros do concreto, aumentando momentaneamente sua permeabilidade, os íons dissolvidos por esta reação tendem a precipitar posteriormente nos poros formados, reduzindo a permeabilidade em suas proximidades. Além disso, deve-se considerar que a presença de água na microestrutura do concreto pode levar à continua hidratação de grãos de cimento não hidratados, preenchendo os poros com os produtos da hidratação e, em consequência, também minimizando a permeabilidade do material (EKSTRÖM, 2003).

O constituinte da pasta de cimento mais suscetível à hidrólise é o hidróxido de cálcio, fato relacionado à sua elevada solubilidade em água pura, da ordem de 1230 mg/L. A lixiviação, também conhecida na literatura como hidrólise dos componentes da pasta de cimento, se mantém até que a maior parte do hidróxido de cálcio disponível seja dissolvido, especialmente caso a estrutura por ela acometida se encontre em presença de água corrente ou de pontos infiltração sob pressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Lagerblad (2001) cita a lixiviação enquanto um processo através do qual a solução presente nos poros do concreto se equilibra com a água que passa através deles, cujo pH está em torno de 6 a 8, conduzindo a mudanças químicas na solução do poro e a dissolução da pasta de cimento. Ainda segundo ele, se a água pode passar pelo concreto, a parcela deste líquido presente no poro será continuamente renovada, acelerando a lixiviação. Como o concreto é um material poroso, deve-se considerar a relação entre sua porosidade, espessura e transmissividade, além da eventual presença de fissuras e outras irregularidades, enquanto fatores capazes de influenciar no desenvolvimento da referida patologia.

A mais comum manifestação da lixiviação é a formação de eflorescências na superfície do elemento estrutural por ela acometida, especialmente naquela através da qual a água percolada sai do concreto. Trata-se de uma crosta branca, constituída essencialmente por carbonato de cálcio. O hidróxido de cálcio dissolvido ($Ca(OH)_2$) e o dióxido de carbono (CO_2), presente no ar atmosférico, naturalmente se associam após a saída da água do concreto, produzindo água (H_2O) e carbonato de cálcio ($CaCO_3$). A formulação apresentada por Freitas Jr. (2013) sintetiza esta reação (Equação 1).

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \quad (1)$$

Por todo o citado, é notável que a perda de massa acaba sendo inerente ao desenvolvimento da lixiviação em uma estrutura de concreto. Assim, boa parte das pesquisas dedicadas ao estudo desta patologia são pautadas na mensuração deste processo, a exemplo das de Santi (2008), que avaliou a perda de massa em uma barragem de concreto compactado com rolo da Usina Hidrelétrica Derivação do Rio Jordão (UHE DRJ); de Joukoski et al. (2010), que realizaram seu estudo em uma barragem do tipo gravidade na bacia do rio Iguaçu, no estado do Paraná; de Szpilman et al. (1994), que avaliaram os efeitos da lixiviação da cal do concreto em uma estrutura da Usina Hidrelétrica de Itaipu (UHE Itaipu), dentre eles a quantidade de cálcio lixiviada; de Rozière et al. (2009), que induziu a lixiviação em laboratório, ao imergir amostras de concreto em água desmineralizada, observando a quantidade de cálcio lixiviada ao longo do tempo; dentre outras.

Como o desenvolvimento da lixiviação é normalmente mais lento que o de outras formas de deterioração, como é o caso da reação álcali-agregado e do ataque por cloretos, por exemplo, ela acaba muitas vezes sendo desconsiderada no projeto de estruturas comuns de concreto. No entanto, torna-se impossível ignorar a deterioração por ela causada quando se trata do projeto de estruturas especiais, com vida útil prolongada, como barragens e tubulações hidráulicas, submetidas ao contato com água por mais de cem anos (IKEDA et al., 2004).

Considerando a importância do estudo da lixiviação, especialmente em obras hidráulicas, a presente pesquisa é proposta, tendo sido esta realizada a partir da identificação de um caso em desenvolvimento da referida patologia na Eclusa 1, estrutura componente do Sistema de Transposição de Desnível da barragem da Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí). Como citado, é recorrente no decorrer da avaliação deste método de deterioração avaliar a perda de massa provocada sobre a estrutura por ela acometida. Neste trabalho, entretanto, mais do que a quantificação da perda de massa em si, é foco a verificação da eficácia da aplicação de regressão polinomial em auxílio à mensuração deste parâmetro.

Entende-se aqui enquanto importante discriminar o procedimento utilizado para a obtenção de um dado resultado, de modo a torná-lo o mais claro e simples possível, auxiliando em sua reprodução futura em outras pesquisas. Isto porque, é recorrente a exposição da metodologia que embasa a quantificação da perda de massa, sendo normalmente apenas fruto da correlação entre resultados da análise química da água lixiviada, a ser comparada com a daquela de referência (fonte da água que tem permeado o concreto, como exemplo tem-se um reservatório de barragem), e medições de vazão nos pontos de deságue da água percolada. No entanto, em estudos deste tipo, de campo e prolongados, é comum que eventualmente ocorram falhas na coleta de dados, sendo imprescindível a aplicação de ferramentas estatísticas para o preenchimento de dados faltantes e estas nem sempre são descriminadas.

Neste estudo de caso, realizado em uma das eclusas de Tucuruí, a ferramenta selecionada foi a regressão, sendo detalhado ao longo do presente artigo a maneira como a mesma foi aplicada. Sua escolha foi motivada pela maior simplicidade e rapidez em aplicá-la, especialmente com o auxílio do software Excel. Esta técnica estatística permite investigar a relação entre variáveis, por meio da elaboração de um modelo (equação). Ela pode ser empregada para entender um processo ou fenômeno; para prever o valor de uma variável tendo por base o conhecimento da magnitude de outras variáveis; para controlar os valores de uma variável dentro de uma determinada faixa de interesse; dentre outras finalidades (AMARAL et al., 2009).

O seu uso pode partir da utilização de diversos tipos de formulações, sejam elas exponenciais, polinomiais, logarítimicas ou outras. Na presente pesquisa, optou-se pela regressão polinomial. Este tipo específico, conforme cita Gomes et al. (2015), nada mais é do que um método de interpolação, através do qual se torna possível a estimativa ou inferência de características desejadas acerca dos dados que se tem, sejam elas em pontos conhecidos ou desconhecidos, desde que abrangidos pelas limitações do estudo.

Como produto da ferramenta estatística aplicada, o intuito era a definição de uma equação que representasse o comportamento das variáveis coletadas em campo, de modo a posteriormente com ela alcançar o valor de dados que ficaram ausentes nestas coletas. Fernandes (1999) relata que o uso de testes de regressão parte da definição de pares de variáveis, sendo uma variável aleatória “Y” (independente), resultado de uma experiência, cuja distribuição é coordenada tanto por parâmetros desconhecidos, como também por influência de uma variável não aleatória “X” (dependente). A determinação dos pares de “X” e “Y”, cuja relação pode ser observada mediante experiência, permite a obtenção de informações valiosas no que tange aos parâmetros de distribuição da variável “Y”, antes desconhecidos.

Para a verificação da qualidade dos modelos gerados, bem como de sua precisão de calibração, foram utilizados coeficientes de determinação (r^2). Basicamente, estes indicam a porcentagem da variação da variável “Y” que é explicada por alterações na variável “X”. Um r^2 entre 0,50 e 0,60 permite inferir que mais de 50% da variação de “Y” é provocada pela variação de “X”, mas ainda se faz possível a discriminação entre concentrações altas e baixas no modelo. Entre 0,66 e 0,81, o r^2 indica predições mais aproximadas e aceitáveis. Entre 0,82 e 0,90, por sua vez, o r^2 revela um bom modelo e, se o mesmo estiver acima de 0,91, a calibração do modelo é considerada excelente (WILLIAMS, 2003 apud SAEYS et al., 2005).

Vale observar que este trabalho é parte da pesquisa realizada por Oliveira (2016), uma das autoras deste trabalho, a qual avaliou os efeitos da lixiviação na estrutura citada, tanto no que tange a perda de massa, quanto às consequências de seu desenvolvimento sobre características intrínsecas do concreto, como resistência à compressão e porosidade.

1.1. Objetivo

Avaliar a aplicação da regressão polinomial em auxílio à mensuração da perda de massa pelo concreto devido à lixiviação, ao observar se esta ferramenta estatística pode ser considerada satisfatória para o preenchimento de falhas que eventualmente ocorram durante a coleta de dados. Basicamente, o parâmetro utilizado para a avaliação dos modelos de regressão gerados foi o coeficiente de determinação, considerado melhor quanto mais próximo estiver de um.

2. ESTRUTURA EM ANÁLISE

O presente trabalho foi desenvolvido com base em informações obtidas durante pesquisa na Eclusa 1, estrutura componente do Sistema de Transposição de Desnível da barragem na qual encontra-se instalada a Usina Hidrelétrica de Tucuruí (UHE Tucuruí), como demonstra a Figura 1. O estudo nela realizado teve por intuito primordial avaliar os efeitos da lixiviação sobre o seu concreto, tendo a patologia sido identificada a partir da observação de intensa deposição de carbonato de cálcio nas paredes e no piso de um dos trechos da galeria de drenagem desta Eclusa, ilustrada na Figura 2, em questão no Bloco 1-A1, cota 26,50 m. Como outrora citado, a esta manifestação da lixiviação é também comum denominar eflorescência.

Figura 1 – Fotografia destacando as estruturas que compõem a barragem da UHE Tucuruí



Fonte: adaptado de Herweg et al., 2004.

Figura 2 – Galeria de drenagem da Eclusa 1, no trecho onde foi identificada a patologia



Fonte: Os autores.

3. METODOLOGIA

Para a mensuração da perda de massa pela estrutura devido à lixiviação, fez-se necessário, a princípio, lançar mão da realização de coletas de água e de medições de vazão frequentes. Foram coletadas amostras tanto da água do reservatório da barragem, à montante da estrutura em análise, quanto daquela vertida através dos drenos de maior vazão, dispostos ao longo da galeria de drenagem do Bloco 1-A1 da

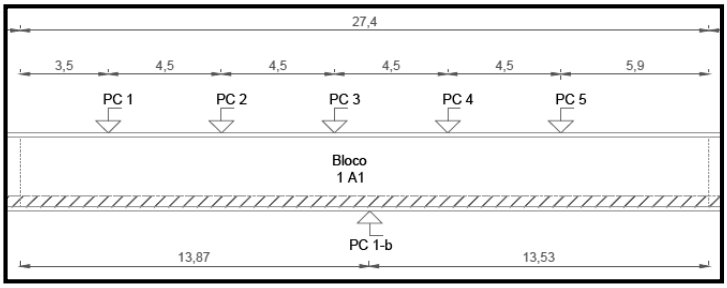
Eclusa 1. Tais amostras eram, preferencialmente, colhidas mensalmente e encaminhadas ao Laboratório de Limnologia e Qualidade da Água da Eletronorte, o qual se disponibilizou a realizar a análise dos parâmetros físico-químicos das mesmas. As medições de vazão, por sua vez, foram executadas pelos autores, de duas a quatro vezes por semana, com auxílio de proveta, com capacidade de dois litros, e de cronômetro.

A perda de massa, propriamente dita, pode ser mensurada por meio de simples multiplicação entre estes dois dados: as concentrações de elementos químicos identificadas nas amostras de água, a exemplo o cálcio, após aplicada a diferença entre valores obtidos para a água do reservatório (considerada referência) e para a água vertida através dos drenos em um mesmo mês; e a média mensal das vazões observadas em cada dreno. A partir desta multiplicação obtém-se a quantidade de massa do concreto lixiviada em um mês, em quilogramas, visto que: as concentrações fornecidas pelo Laboratório estavam normalmente em miligramas por litro (mg/L) e as vazões foram medidas em litros por hora (L/h). Após proceder com as devidas conversões das unidades fornecidas, alcançava-se uma massa, em quilogramas, em função de um espaço de tempo, comumente mensal. Da soma dos valores individuais obtidos para cada mês, e os respectivos drenos, em que foi realizada a pesquisa fez-se possível alcançar a quantidade de perda de massa pela estrutura em um ano.

Uma vez que o objetivo deste artigo é avaliar a aplicação da regressão polinomial em auxílio à mensuração da perda de massa pelo concreto, o foco dos procedimentos do mesmo, bem como de seus resultados, estará no tratamento estatístico dos dados fornecidos pelo Laboratório, especificamente com relação as concentrações de íons cálcio, uma vez que este elemento químico costuma ser o mais suscetível ao fenômeno patológico em análise. Assim, o processo completo foi a pouco citado apenas para esclarecimento quanto ao que foi executado e a finalidade da análise que será aqui apresentada. Portanto, vale observar dois pontos essenciais à descrição dos métodos que nortearam este trabalho: a concentração de íons cálcio (Ca^{2+}), em mg/L, pôde ser encontrada por meio de titulometria com EDTA; e a regressão foi a ferramenta estatística selecionada para o preenchimento de dados faltantes, principalmente devido a possibilidade por ela conferida de conhecer a equação que rege a relação entre variáveis (uma dependente ou de resposta, e outra indepentente ou explicatória) e a simplicidade envolvida em sua aplicação.

Nesta pesquisa, dados relacionados à concentração de íons cálcio estiveram ausentes por razão da impossibilidade de realizar coleta de quantidade suficiente para as análises químicas em três dos seis drenos considerados no estudo, sendo eles os pontos de coleta 1, 5 e 1-b (PC 1, PC 5 e PC 1-b, respectivamente), de reduzida vazão; bem como por causa da impossibilidade de atendimento pelo laboratório em quatro dos doze meses da pesquisa, os quais foram novembro, dezembro, fevereiro e abril, devido à necessidade de dar assistência à outras demandas nestes períodos. Foi no intuito de preenchê-los e, assim, tornar mais verossímil a mensuração da perda de massa, que optou-se pelo uso da estatística. No caso do dreno 1-b, foi possível realizar algumas coletas, no entanto, não em quantidade suficiente para gerar uma equação que representasse seu comportamento. A Figura 3 ilustra o posicionamento dos seis drenos citados.

Figura 3 – Ilustração do posicionamento dos pontos de coleta (PC's) considerados na pesquisa ao longo galeria de drenagem, em planta baixa



Fonte: Os autores.

A concentração de íon cálcio foi selecionada, portanto, enquanto a variável dependente, uma vez que esta era aquela que se desejava determinar nos pontos em que dados faltantes eram notados. Para explicá-la, enquanto variável independente, foram escolhidas duas variáveis conhecidas, cada uma a seu tempo, sendo denominados Teste 1 aquele no qual a variável "cota do reservatório à montante da Eclusa 1" foi

utilizada (dado diariamente atualizado no site da Eletronorte), e Teste 2 aquele onde a variável empregada foi a "vazão média mensal" de cada dreno analisado, medida conforme anteriormente descrito.

O programa computacional utilizado para o tratamento estatístico foi o EXCEL. No mesmo foram inseridos os dados obtidos, referentes às três variáveis observadas: concentração de íons cálcio, cota do reservatório e vazão média mensal dos drenos. Gráficos de dispersão foram gerados, utilizando para o Teste 1 a concentração de íons cálcio enquanto variável "X" e a cota do reservatório como variável "Y" e para o Teste 2, por sua vez, semelhante variável "X" e as vazões dos drenos, considerados separadamente, enquanto variável "Y". Em posse destes gráficos, para a aplicação da regressão, foi solicitado ao programa que gerasse uma linha de tendência para cada par de variáveis testado, acompanhada da equação da mesma e de seu coeficiente de determinação.

Durante a análise, todos os tipos de formulações permitidas pelo programa foram testadas. No entanto, rapidamente fez-se possível observar que as equações polinomiais eram aquelas que permitiam os melhores ajustes. Vale observar que, tanto para a comparação entre os testes realizados quanto para a definição da melhor formulação a ser aplicada na pesquisa, foi tomado enquanto parâmetro para a avaliação da qualidade do ajuste do modelo o coeficiente de determinação gerado, dando preferência para aqueles com valores mais próximos de um e observando os intervalos definidos por Williams (2003 apud SAEYS et al., 2005), apresentados no Capítulo 1.

Considerando que equações polinomiais, a partir da terceira ordem, já não geram simples parábolas, mas configurações mais complexas – que não necessariamente melhor representam o comportamento das variáveis –, e de modo a padronizar as análises, foram aplicadas ao longo de toda a pesquisa, tanto para o Teste 1 quanto para o Teste 2, equações polinomiais de segundo grau. No capítulo seguinte, são apresentados os resultados da aplicação da regressão polinomial, empregada para a obtenção da equação que rege o comportamento das concentrações de íons cálcio de cada dreno em relação as variáveis independentes selecionadas. Quanto aos drenos que não possuiam concentrações disponíveis em nenhum mês, o preenchimento de seus dados faltantes foi feito a partir da determinação da média das concentrações encontradas para os demais drenos, ou seja, para os pontos de coleta 2, 3 e 4 (PC 2, PC 3 e PC 4, respectivamente). A análise da dispersão entre os valores destes três drenos também foi observada, por meio da determinação da variância (Var), do desvio padrão (DP) e do coeficiente de variação (CV) entre eles.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1, mostrada na página seguinte, apresenta os dados faltantes no que tange as concentrações de íons cálcio. Conforme citado no capítulo anterior, eles puderam ser notados em quatro dos meses da pesquisa e em três dos drenos considerados para a mensuração da perda de massa pelo concreto devido à lixiviação.

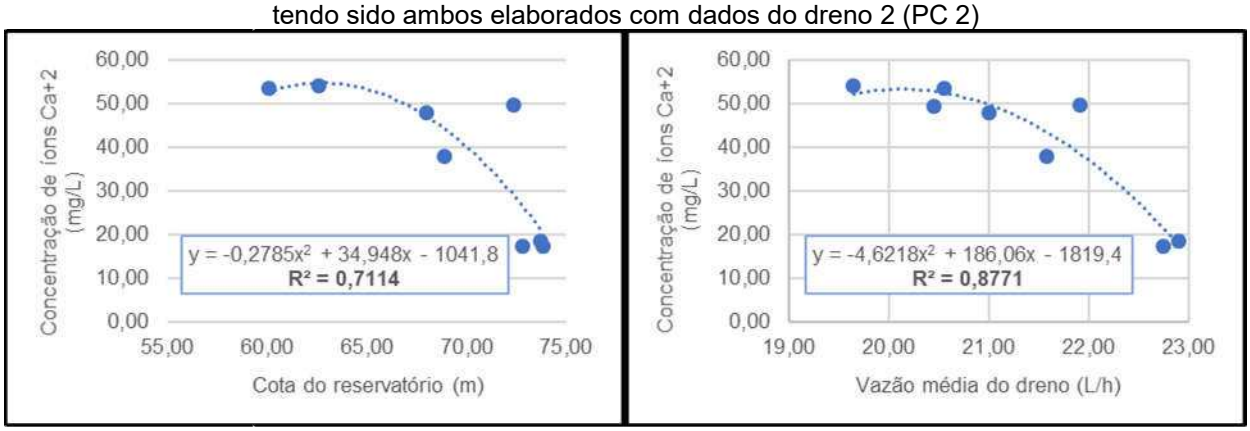
Tabela 1 - Concentrações de Ca^{+2} (mg/L) obtidas, ressaltando os dados faltantes ("x")

Mês	Data da coleta	Ponto de Coleta da Amostra						
		PC 1	PC 2	PC 3	PC 4	PC 5	PC 1-b	Lago
Junho	03/06/2015	x	17,28	15,84	17,60	x	x	4,03
Julho	08/07/2015	x	18,56	18,24	18,56	x	x	4,75
Agosto	14/08/2015	x	49,68	52,56	50,80	x	x	3,97
Setembro	18/09/2015	x	48,00	46,00	34,40	x	x	4,99
Outubro	02/10/2015	x	54,08	57,20	56,20	x	51,52	x
Novembro	-	x	x	x	x	x	x	x
Dezembro	-	x	x	x	x	x	x	x
Janeiro	22/01/2016	x	53,60	54,88	49,44	x	51,20	2,99
Fevereiro	-	x	x	x	x	x	x	x
Março	03/03/2016	x	37,92	55,20	53,92	x	43,36	5,31
Abril	-	x	x	x	x	x	x	x
Maio	31/05/2016	x	49,28	56,64	49,76	x	46,88	4,03

Fonte: os autores.

No decorrer da análise por regressão polinomial, pode-se observar que dentre os dois testes aplicados o mais satisfatório, considerando o coeficiente de determinação (r^2) mais próximo de um através dele obtido, foi o Teste 2, o qual correlaciona a concentração de íons cálcio (Ca^{+2}) com a vazão média mensal de cada dreno. Esta vantagem do Teste 2 sobre o Teste 1 se repetiu para os três drenos analisados (PC 2, PC 3 e PC 4). A Figura 4 mostra o comparativo entre os dois testes, apresentando os gráficos, equações e coeficientes de determinação obtidos para ambas as correlações ao tratar dos dados do dreno 2 (PC 2), apenas para exemplificar o citado. Na Figura 5, por sua vez, estão conjuntamente ilustrados os resultados das correlações dos dados dos drenos 3 e 4 (PC 3 e PC 4), somente para o Teste 2.

Figura 4 – Gráficos da regressão polinomial obtidos por meio do Teste 1, à esquerda, e do Teste 2, à direita, tendo sido ambos elaborados com dados do dreno 2 (PC 2)



Fonte: os autores.

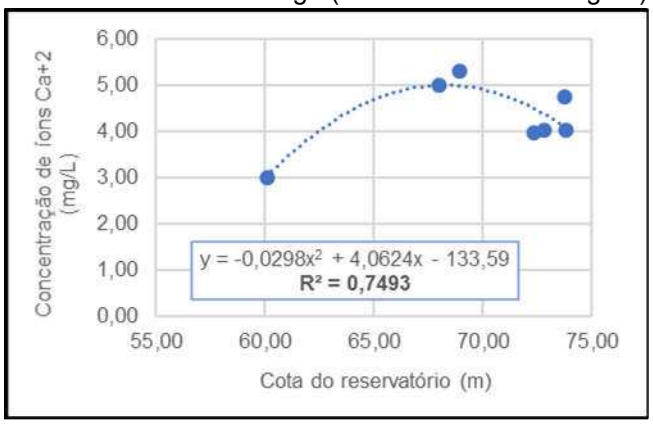
Figura 5 – Gráficos da regressão polinomial obtidos por meio do Teste 2, tendo sido um elaborado com dados do dreno 3 (PC 3), à esquerda, e outro com dados do dreno 4 (PC 4), à direita



Fonte: os autores.

Como se pode notar pela observação da Tabela 1, apresentada anteriormente, também os dados relativos à concentração de íons cálcio da água do reservatório (ou lago) tiveram algumas falhas distribuídas entre os meses em que foi realizada a pesquisa. Neste caso, o Teste 2 não se aplicaria, uma vez que não foi medida uma vazão relativa ao lago, tido como referência. Logo, apenas o Teste 1 foi utilizado e seu resultado encontra-se apresentado na Figura 6, disposta na página seguinte.

Figura 6 – Gráfico da regressão polinomial obtido por meio do Teste 1, tendo sido ele elaborado com base em dados relativos ao lago (reservatório da barragem)



Fonte: os autores.

Como observado nas Figuras 4 e 5, tendo como parâmetro os coeficientes de determinação encontrados e os intervalos definidos por Williams (2003 apud SAEYS et al., 2005), os modelos obtidos através do Teste 2 para os pontos de coleta 2 e 3 (PC 2 e PC 3) podem ser considerados bons (o r² de ambos foi igual a 0,88, com arredondamento para duas casas decimais) e aquele alcançado para o ponto de coleta 4 (PC 4) um modelo aceitável (r² igual a aproximadamente 0,73). Estes resultados permitem inferir que a influência da vazão dos drenos sobre as concentrações de íons cálcio tem sido sempre superior a 73%. No entanto, indica ainda que outras variáveis são capazes de influenciar nesta concentração, inclusive a própria cota do reservatório. Quanto ao modelo gerado por meio do Teste 1 com os dados do lago (mostrado na Figura 6), o qual obteve coeficiente de determinação de aproximadamente 0,75, pode ser considerado também aceitável, com correlação entre a concentração de íons cálcio em suas amostras e a cota do reservatório de 75%, estando os demais 25% relacionados a outras variáveis diversas.

As equações encontradas para os três drenos e para o lago, também mostradas nas figuras anteriormente apresentadas, permitem preencher as lacunas existentes nas colunas PC 2, PC 3, PC 4 e Lago, dentre os “pontos de coleta de amostra” presentes na Tabela 1. Faz-se isto ao utilizar a vazão média de cada mês em que havia dado ausente enquanto o “x” da equação encontrada para cada dreno, o “y” resultante é a concentração de íon cálcio do respectivo mês. No caso das amostras do lago, por sua vez, o “x” empregado é a cota média do reservatório no mês analisado.

Como citado no capítulo anterior, considerando que nos drenos 1, 5 e 1-b não foram realizadas coletas suficientes para que para eles fosse formulada uma equação por meio da regressão polinomial, os valores das concentrações de cálcio para eles, em cada mês, foram estimados com base na média mensal dos demais pontos de coleta (PC 2, PC 3 e PC 4). No dreno 1-b, apenas os três meses em que análises foram efetivamente realizadas foram mantidos.

A Tabela 2, disposta na página seguinte, reúne as concentrações de todos os meses para os drenos 2, 3 e 4, encontradas tanto pela análise laboratorial quanto pelo tratamento estatístico, bem como a média destas, a variância (Var) existente entre esses valores, o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV). Nesta tabela, os coeficientes de variação dos doze meses estão distribuídos em três cores, tendo por base classificações adotadas por Gomes (2000) e representando: baixa dispersão, de até 10%, em verde; dispersão média, de 10 a 20%, em amarelo; e dispersão muito alta, acima de 30%, em vermelho. Nenhum mês apresentou dispersão alta (entre 20 e 30%).

Ao observar, na sequência, a referida Tabela 2, percebe-se que as concentrações de íons cálcio apresentaram reduzida dispersão na maioria dos meses em que foi realizada a análise. Os meses de setembro e março, por sua vez, demonstraram dispersão média, e o mês de dezembro dispersão muito alta. É possível notar que a concentração do dreno 3 (PC 3) no mês de dezembro foi a que apresentou um valor mais distante dos demais, podendo ser justificada por algum problema localizado com esta amostra, durante sua coleta ou análise em laboratório. Visando evitar prejuízos para a estimativa da concentração neste mês para os outros três drenos (PC 1, PC 5 e PC 1-b) optou-se por realizar novamente a média,

desconsiderando apenas neste mês a concentração de PC 3. Assim, a média do mês de dezembro foi alterada para 36,07 mg/L, a variância para 14,47 (mg/L)², o desvio padrão para 3,80 mg/L e o coeficiente de variação para 10,55%, valor considerado relativo a uma dispersão média. As três médias com dispersão considerada mediana foram aqui tidas enquanto aceitáveis e mantidas para o preenchimento dos dados faltantes.

Tabela 2 – Média, variância, desvio padrão e coeficiente de variação das concentrações de PC 2, PC 3 e PC 4

Mês	Conc. de Ca+2 – PC 2 (mg/L)	Conc. de Ca+2 – PC 3 (mg/L)	Conc. de Ca+2 – PC 4 (mg/L)	Média (mg/L)	Var (mg/L)²	DP (mg/L)	CV (%)
Junho	17,28	15,84	17,60	16,91	0,88	0,94	5,55
Julho	18,56	18,24	18,56	18,45	0,03	0,18	1,00
Agosto	49,68	52,56	50,80	51,01	2,11	1,45	2,85
Setembro	48,00	46,00	34,40	42,80	53,92	7,34	17,16
Outubro	54,08	57,20	56,20	55,83	2,54	1,59	2,85
Novembro	50,90	52,96	49,94	51,27	2,39	1,54	3,01
Dezembro	33,38	20,27	38,76	30,80	90,47	9,51	30,88
Janeiro	53,60	54,88	49,44	52,64	8,09	2,84	5,40
Fevereiro	50,55	56,19	50,68	52,47	10,36	3,22	6,14
Março	37,92	55,20	53,92	49,01	92,71	9,63	19,64
Abril	51,25	56,60	50,44	52,76	11,20	3,35	6,34
Maio	49,28	56,64	49,76	51,89	16,96	4,12	7,93

Fonte: os autores.

A Tabela 3, a seguir, apresenta os valores encontrados para o preenchimento dos dados faltantes mostrados na Tabela 1. Nela, estão destacados em vermelho os dados obtidos através do uso da regressão polinomial ou da média de seus resultados; os demais, advindos das análises laboratoriais, encontram-se em preto.

Tabela 3 – Concentrações de íons cálcio de todos os pontos de coleta e em todos os períodos de análise, estando em destaque aqueles obtidos por meio do uso de ferramentas estatísticas

Mês	Ponto de Coleta da Amostra						
	P1	P2	P3	P4	P5	P1-b	Lago
Junho	16,91	17,28	15,84	17,60	16,91	16,91	4,03
Julho	18,45	18,56	18,24	18,56	18,45	18,45	4,75
Agosto	51,01	49,68	52,56	50,80	51,01	51,01	3,97
Setembro	42,80	48,00	46,00	34,40	42,80	42,80	4,99
Outubro	55,83	54,08	57,20	56,20	55,83	51,52	3,93
Novembro	51,27	50,90	52,96	49,94	51,27	51,27	2,74
Dezembro	36,07	33,38	20,27	38,76	36,07	36,07	2,04
Janeiro	52,64	53,60	54,88	49,44	52,64	51,20	2,99
Fevereiro	52,47	50,55	56,19	50,68	52,47	52,47	4,75
Março	49,01	37,92	55,20	53,92	49,01	43,36	5,31
Abril	52,76	51,25	56,60	50,44	52,76	52,76	4,39
Maio	51,89	49,28	56,64	49,76	51,89	46,88	4,03

Fonte: os autores.

Como outrora citado, no capítulo referente a metodologia, a quantidade de íon cálcio lixiviada é equivalente a quantidade verificada em cada dreno, a partir da análise química da água nele coletada, subtraída da quantidade presente nas amostras de água extraídas do lago no mesmo período. Logo, em posse de todas as concentrações, dos drenos e do lago, nos meses dedicados a pesquisa, torna-se simples mensurar a massa deste íon lixiviada através de cada dreno mensalmente, bastando apenas multiplicar a diferença de concentração entre as águas dos drenos e do lago com a vazão média de cada dreno no respectivo mês.

Assim, constata-se a capacidade que a aplicação de ferramentas estatísticas possui de auxiliar na mensuração de perda de massa pelo concreto devido à lixiviação. Visto que, sem a aplicação da regressão polinomial, que foi o dispositivo estatístico aqui selecionado, por seu melhor ajuste ao modelo, bem como por sua simplicidade de aplicação e eficácia, haveria maior dificuldade na estimativa destes efeitos da patologia e menor precisão ao fazê-lo, uma vez que muitos dados acabariam sendo desconsiderados devido à sua ausência nos resultados da análise química.

O fato de esta ferramenta fornecer a equação que rege um comportamento, torna-a de grande valia para pesquisas como esta, que, por serem de campo, podem ter que eventualmente lidar com falhas em coletas ou análises. Ela permitiu, como notado na Tabela 3, que todos os dados ausentes fossem encontrados para os drenos 2, 3 e 4, bem como para lago, uma vez que para eles existiam dados suficientes para que seu comportamento se tornasse conhecido. Nos drenos 1, 5 e 1-b, por sua vez, a regressão polinomial não pode ser diretamente utilizada por ausência de dados, mas os resultados de seu emprego puderam agregar ao uso da média dos drenos PC 2, PC 3 e PC 4, cujos dados se tornaram conhecidos, viabilizando o preenchimento de todos os dados faltantes.

5. CONCLUSÕES

A lixiviação do concreto é uma patologia que acarreta diversas consequências para a estrutura por ela acometida, podendo ser considerada enquanto principal a perda de massa pela mesma. Conforme descrito ao longo do presente artigo, estimar a magnitude desta perda auxilia na observação dos efeitos do referido mecanismo de deterioração e fazê-lo é relativamente simples, bastando associar análises químicas da água que passa através do concreto, em pontos à jusante e à montante do local por ela atravessado, e medições da vazão com que ela sai da estrutura.

No caso do estudo realizado na Eclusa 1, estrutura componente da barragem da UHE Tucuruí, considerando que a pesquisa se estendeu ao longo de um ano e foram inevitáveis a existência de falhas na frequência das análises químicas citadas, fez-se necessário lançar mão de uma ferramenta estatística que permitisse o adequado preenchimento dos dados faltantes, tendo sido para tal finalidade escolhida a regressão polinomial, aplicada com o auxílio do EXCEL.

A referida ferramenta se mostrou prática e extremamente eficaz, uma vez que permitiu preencher todas as falhas presentes nos dados das concentrações de íons cálcio, ao possibilitar o conhecimento da equação que conduz o comportamento daqueles drenos para os quais existiam dados de laboratório suficientes para gera-la (PC 2, PC 3 e PC 4), bem como para o lago, com coeficientes de determinação sempre superiores a 0,73, promovendo a disponibilidade de modelos considerados de aceitáveis a bons, segundo os intervalos definidos por Williams (2003 apud SAEYS et al., 2005). Com os dados obtidos para estes drenos, fez-se possível, por meio do uso de sua média, preencher os dados ausentes para os demais drenos, os quais não possuíam informações em quantidade capaz de permitir que a regressão os conduzisse a uma equação de seu comportamento. Quanto às variáveis independentes testadas, a que se mostrou mais eficaz para a formulação de equações, tendo como parâmetro de qualidade do modelo o coeficiente de determinação (r^2) gerado, foi a vazão dos drenos (Teste 2), para os três drenos considerados, e a cota do reservatório (Teste 1), quando o objeto de análise foi a água do lago.

A regressão polinomial se apresentou, portanto, enquanto uma ferramenta útil à finalidade apresentada, em questão: ao auxílio à mensuração da perda de massa de estrutura de concreto devido à lixiviação, ao conduzir o preenchimento de dados faltantes em análises químicas realizadas tanto na água percolada através de drenos da mesma quanto na água do lago à montante dela, ao longo de doze meses.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Eletrobras Eletronorte pela disponibilização da estrutura para à realização da presente pesquisa, bem como de seu laboratório de liminologia e qualidade da água para a execução das análises físico-químicas das amostras de água coletadas.

7. REFERÊNCIAS

AMARAL, G. D.; SILVA, V. L.; REIS, E. A. **Análise de regressão linear no pacote R**. Relatório Técnico. [Belo Horizonte]: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

EKSTRÖM, T. **Leaching of concrete:** The leaching process and its effects. Lund: Lund University, [2003]. 357 p. Doctoral Thesis.

FERNANDES, E. M. G. P. **Estatística aplicada**. Braga: Universidade do Minho, 1999.

FREITAS JR., J.A. **Materiais de construção (TC-031):** Durabilidade do concreto. Material de aula. Curitiba: Universidade Federal do Paraná (UFPR), 2013.

GOMES, F. P. **Curso de estatística experimental**. 1. ed. [S.l.]: FEALQ, 2000.

GOMES, O. M.; SANTOS, C. A. C.; SOUZA, F. A. S.; PAIVA, W.; OLINDA, R. A. Análise comparativa da precipitação no estado da Paraíba utilizando modelos de regressão polinomial. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 1, p. 47-58. 2015.

HERWEG, C.; FERNANDES, F. E.; GAMA, H. R.; BANDEIRA, O. M.; LACERDA, S. S. Avanços técnicos aplicados na construção das estruturas de concreto da Barragem de Tucuruí. In: Conferência Internacional Conjunta ACI – IBRACON - Comemoração dos 100 anos do American Concrete Institute. **Anais...** São Paulo, 2004.

IKEDA, M.; OTSUKI, N.; NISHIDA, T.; MINAGAWA, H. Influence of type of cement on Ca leaching from concrete using experimental acceleration method. In: 29th Conference on Our World in Concrete & Structures. **Anais…** Singapore, 2004.

JOUKOSKI, A; PORTELLA, K. F.; ALBERTI, E. L.; MILDEMBERGER, L.; RODRIGUES, L. T. Estudo e acompanhamento da perda de massa iônica em barragem de concreto compactado com rolo, em decorrência da percolação de água pela estrutura. In: VI Congreso Internacional sobre Patología e Recuperacíon de Estructuras (CINPAR). **Anais…** Córdoba (Argentina), 2010.

LAGERBLAD, B. **Leaching performance of concrete based on studies of samples from old concrete constructions**. 80 p. Technical Report. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 2001.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO P.J.M. **Concreto:** microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. (português). São Paulo: IBRACON, 2014.

OLIVEIRA, T.V. **Estudo da lixiviação em desenvolvimento no concreto da Eclusa 1, estrutura componente do Sistema de Transposição da Barragem de Tucuruí**. Monografia. Tucuruí: Universidade Federal do Pará, 2016.

ROZIÈRE, E; LOUKILI, A.; HACHEM, R.; GRONDIN, F. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks. **Cement and Concrete Research**, v. 39, p. 1188-1198. 2009.

SAEYS, W.; MOUAZEN, A. M.; RAMON, H. Potential for onsite and online analysis of pig manure using visible and near infrared reflectance spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v. 91 (4), p. 393-402. 2005.

SANTI, M.R.A. **Metodologia para avaliação da perda de massa em barragem de Concreto Compactado com Rolo (CCR)**. 103 p. Dissertação. Curitiba: UFPR, 2008.

SICAKOVA, A.; ESTOKOVA, A. Some aspects of study the leaching and acid corrosion of concrete. **International Journal of Civil, Structural, Construction and Architectural Engineering**, v.8, n. 5, p. 543-546, 2014.

SZPILMAN, A.; ROSSO, J. A.; CIFÚ, S.; KUPERMAN, S. C.; GONTIJO, M. C. Avaliação dos efeitos de lixiviação da cal no concreto de enchimento da fundação da casa de força de Itaipu. In: XXI Seminário Nacional de Grandes Barragens. **Anais...** v. 2. Tema III. Rio de Janeiro: CBDB, 1994.