

## AValiação DA TÉCNICA BIOCIMENTANTE EM SOLO ARENOSO NO CONTROLE DE *PIPING* EM SISTEMAS DE DRENAGEM PLUVIAL URBANA

**Lucas Valério de Oliveira**

Universidade de Passo Fundo  
lucas.valerio@icloud.com

**Márcio Felipe Floss**

Universidade de Passo Fundo  
marciofloss@upf.br

**Resumo.** *A drenagem pluvial urbana quando submetida a uma demanda superior ocasionada pelas enormes quantidades de chuva leva a pressão de água exercida nas paredes das tubulações acarretar falhas e rompimentos de condutos e/ou galerias e conexões. Como consequência, a água no interior consegue permear pelas avarias causadas formando caminhos preferenciais, conhecidos como piping ou erosão tubular progressiva, fenômeno que atravessa a camada de solo erodindo-o até a superfície. Diante do problema, ao buscar na literatura, meios de combater a erosão interna da camada de solo, relatou-se que o aumento na coesão do solo, redução dos vazios e diminuição da permeabilidade de água na camada, podem oferecer a solução no combate da erosão tubular progressiva. Entre as técnicas que podem agregar melhor as propriedades citadas, destaca-se a biocimentação, procedimento relativamente novo que visa melhorar as características dos solos através de bactérias naturalmente presentes no meio e nutri-las com solução adequada que resultará na precipitação do carbonato de cálcio nos vazios do solo localmente. Com este procedimento, objetiva-se de tal maneira, tratar um solo arenoso com a técnica da biocimentação e submete-lo a um experimento em escala reduzida para simular*

*o piping com conseqüente erosão do solo ocorrido nas vias urbanas causadas pelo escape de água das tubulações de drenagem urbana. A base para esta avaliação deu-se de forma visual, junto com uma exumação da amostra submetida ao experimento e pela mensuração da pressão aplicada através do manômetro situado na entrada do sistema. Após a finalização da biocimentação, observou-se o comportamento do solo arenoso e verificou-se que a técnica é adequada no combate e na redução da erosão tubular progressiva pois a resistência do solo arenoso aumentou em 7,5 a 15 vezes a pressão necessária para ruptura sem o tratamento.*

**Palavras-chave:** *Biocimentação. Piping. Melhoria de solos.*

### 1. INTRODUÇÃO

Ao avaliar problemas decorrentes de crateras causadas nas vias urbanas, relata-se casos em que a drenagem urbana de águas pluviais, quando mal dimensionada, não atende a condição de trabalhar como conduto livre e obriga-se a funcionar como conduto forçado, com a água exercendo pressão em suas paredes, submetendo o sistema a transientes hidráulicos e provocando condições não esperadas em projeto. A

pressão pode chegar a ponto de causar danos estruturais aos condutos, acarretando em escape da água destes para o solo (SILVA, 2015). A água quando submetida em pressão pelo solo assume um fluxo concentrado neste, podendo criar uma erosão tubular progressiva ou também conhecido por *piping* da qual haverá o carreamento de partículas de jusante para montante no maciço de solo, o qual crescerá progressivamente causando colapso da área e desmoronamento do material suportado pelo solo erodido (LADEIRA, 2007). Usualmente o solo que envolve as tubulações são arenosos, granulares, de poucos finos com uma resistência ao cisalhamento compondo sua capacidade de suporte (SCHMITZ, 2002). Mullins et al., (1990, *apud* Silva e Carvalho, 2007) afirma que solos arenosos contam com uma baixa parcela coesiva, portanto, não possuem atração entre partículas, e também são mais propensos a um índice vazios superior que os solos argilosos e coesivos, facilitando a permeabilidade de água nestes espaços, já que possuem um coeficiente de permeabilidade K mais elevado. Cruz (1996), destaca que barragens – que são estruturas que também estão sujeitas ao *piping* – que possuem materiais coesivos são aquelas que suportam melhor o fenômeno. Considerando que localmente o solo usado nas vias urbanas são de origem arenosa sem a parcela coesiva, pode-se aplicar técnicas que aumentem a coesão do material preenchendo os vazios, dificultando a percolação de água evitando de tal maneira o *piping*.

Entre as técnicas disponíveis para aumentar a coesão de um material, avaliou-se a biocimentação como um processo novo, que traz resultados ao aplicar no solo soluções que em contato com bactérias naturalmente presentes, irão precipitar o carbonato de cálcio no meio, em uma técnica conhecida como *Microbiologically Induced Calcite Precipitation* (MCIP) traduzida para o português como precipitação microbialmente

induzida de carbonato de cálcio (GARBIN, 2016). O carbonato de cálcio quando precipitado em forma de calcita tornará a massa de solo coesa pela biocimentação local. O aumento da coesão do material traz consigo características que melhoram o desempenho do solo pelo aumento da resistência, e pelo preenchimento dos vazios. Um solo com tais características torna-o menos propenso ao fenômeno da erosão tubular progressiva ou *piping*. O uso da biocimentação é justificado por ser uma técnica menos agressiva ao meio ambiente. Sabe-se que o principal responsável pelo efeito estufa é dióxido de carbono e que cerca de uma tonelada deste é liberada na atmosfera para cada tonelada de cimento produzido (PEDREIRA, 2014). Portanto ao escolher a biocimentação em solo arenoso como tratamento no controle do *piping*, realizou-se em razão de suas características ecológicas e mais ambientalmente amigável.

Como objetivo, este trabalho deseja avaliar uma amostra de solo arenoso, da jazida de Osório - RS, tratada com uma técnica biocimentante que quando submetida a gradientes hidráulicos excedentes e formadores do *piping*, possa atuar no controle de tal ocorrência.

## 2. PIPING – EROSÃO TUBULAR PROGRESSIVA

As crateras superficiais podem ser provocadas por defeitos estruturais em condutos de água da drenagem urbana que levam a um destino apropriado águas das chuvas e tempestades. Esses condutos encontram-se enterrados no solo ao longo de ruas e estradas e também próximas aos passeios e residências que circundam as vias urbanas. Os condutos podem sofrer diversos defeitos em sua estrutura, outros exemplos além da deterioração por pressão e velocidade excessiva de água são aqueles que correspondem a instalação inadequada ou

quando são deteriorados com o tempo. Quando a água passa a ter fluxo na camada de solo, este pode ser deslocado e criar um vazio de diversos tamanhos e formatos e chegar a superfície, neste ponto o fluxo de água chega a ponto de aumentar a erosão do local e carregar as partículas de solo em si (THE RESOURCE, 2010).

O fenômeno que ocorre a erosão progressiva com formato circulares como tubos na massa de solo aliado ao carreamento de partículas no interior dos solos pelo fluxo de água é denominado *Piping*. Processo que pode evoluir ao colapso do terreno, causando desabamentos do material superior e escorregamentos, formando uma destruição de grandes dimensões (GALETI, 1987).

Os solos em sua maioria apresentam problemas de drenagem, que são erodidos pela falta de proteção em suas superfícies pela força de água proveniente de muitas formas infiltração superficial ou pelo escape de drenos e filtros entupidos pelas partículas de solos, levando de modo ao *Piping failure* (CBCN, 2010).

Os dutos que se formam pela ação da água por caminhos preferenciais podem evoluir por diversas maneiras a chegam ao extremo de erodir o solo superficial, causando arraste do material para seu interior, causando verdadeiras crateras e depressões na camada superior (IPT, 2009).

Como fatores determinantes para evitar a formação de *piping*, destacam-se o grau de compactação, tamanho das partículas, correta distribuição granulométrica em áreas de transição de matérias e monitoramento de parâmetros geotécnicos. Outro fator que favorece ao evento de desorganização de linhas de fluxo e conseqüente ao início da erosão interna é o aumento das poropressões causando desequilíbrio do estado de tensões do solo. Fatores também característicos ao surgimento ou não de *piping* são o coeficiente de condutividade hidráulica  $K$  e a sucção  $\psi$ ,

ambos em função da saturação, quanto menor o  $K$ , os espaços entre partículas serão bem pequenos, tornando menos provável o fluxo líquido no meio (LADEIRA, 2007).

De um modo geral Ladeira (2007) cita que os três principais fatores para ocorrência de *piping* são o fluxo descontrolado de água que percola nos vazios e reduzem a tensão entre grãos. Outro fator leva em conta a geração de pressão hidrostática que preenchem fendas e trincas com água e cita também finalmente a formação de frentes de saturação as quais reduzem a resistência do solo pela perda da coesão aparente.

Nos levantamentos de dados, Ladeira (2007), relata que diversos autores, identificaram seis eventos que são considerados críticos e levam a formação do *piping*, entre eles destacam-se a existência de fluxo concentrado de água no interior do solo e o gradiente hidráulico crítico ou velocidade de percolação da água elevados o bastante para iniciar o *piping*.

Azevedo e Albuquerque Filho (1998, *apud* Castro, 2008) apontam que locais onde atinge-se valores acima do gradiente hidráulico crítico ocorre a ruptura hidráulica causada pelas forças de percolação da água. Abrem-se pequenas cavidades que concentram o fluxo de água causando um aumento no gradiente. O *piping* então é um fenômeno que pode iniciar sob condições de gradiente hidráulico crítico.

Para Cruz (1996), materiais que possuem coesão, aliada a tração impossibilita que haja a formação destas trincas, isso pois haverá um aumento da sucção na região. Portanto a resistência à tração ou a coesão é o que também podem condicionar a formação desse fenômeno.

### 3. BIOCIMENTAÇÃO

A construção civil de um modo em geral consome muitos materiais de fontes não-

renováveis, os quais contribuem para a emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Como técnica ecológica tanto na engenharia em geral como na engenharia geotécnica, capaz de suprir a demanda por processos menos agressivos ao meio ambiente, destaca-se a biocimentação, uma técnica baseada na precipitação de carbonato de cálcio através de microrganismos induzidos a realizar esta reação (ARIANTY, et al., 2012).

Quando descoberto que microrganismos estão envolvidos na precipitação de carbonato, este liderou ao desenvolvimento de bioprocessos no campo da construção civil (ARIANTY, et al., 2012). A aplicação de uma técnica de biocimentação pode ser usada em processos de diversas áreas como na construção civil, petróleo, meio ambiente, no controle da erosão, e no ganho de resistência e estabilização do solo (MUYNCK et al., 2010). Além destes a biocimentação também conhecida como precipitação de calcita microbialmente induzida, tem sido apresentada como uma técnica capaz de reduzir o potencial de liquefação de solos arenosos a níveis muito satisfatórios pela redução da permeabilidade, aumentando a resistência ao cisalhamento e a rigidez do solo (DEJONG, et al., 2012).

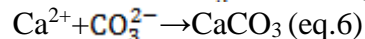
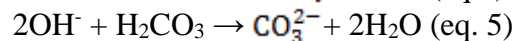
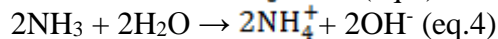
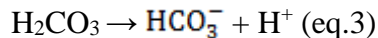
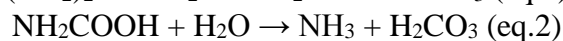
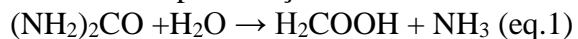
A precipitação do carbonato de cálcio no solo pode ser possível devido a atividade microbológica local que produz pequenos cristais de calcita no meio. Este é um fenômeno comum na natureza e encontrado em diferentes fontes como em água do mar, água fresca e também em solos. Para a precipitação ocorrer é necessário que quatro fatores estejam presentes em quantidades suficientes como concentração de cálcio (Ca<sup>2+</sup>), concentração de carbono inorgânico dissolvido (DIC), pH adequado em que estudos recomendam um meio em torno de 10,0 e disponibilidade de locais para ocorrer as reações também chamados de locais de nucleação. Quanto aos microrganismos, são

considerados os mais eficientes aqueles que são capazes de criar e se desenvolver em um meio alcalino (ARIANTY, et al., 2012).

A alta atividade da enzima uréase no metabolismo de alguns microrganismos é o que se tem sido usado como ferramenta para induzir a precipitação do carbonato de cálcio. A uréase irá promover a hidrólise da ureia e formar íons de carbonato e amônio, o que resultara em um pH mais elevado e um sistema rico em íons de carbonato (ARIANTY, et al., 2012).

As reações químicas que levam ao tratamento desejado de um solo biocimentado passam pela hidrólise de um mol de ureia intracelular em um mol de amônia e um mol de carbamato, representada pela equação 1, o qual é instantaneamente hidrolisado em um mol de amônia e um mol de ácido carbônico (eq. 2). O ácido carbônico na presença de água forma bicarbonato (eq. 3), enquanto a amônia forma dois mols de amônio e íons de hidróxido (eq. 4). Os íons de hidróxido reagem com o ácido carbônico do meio e forma íons de carbonato e moléculas de água (eq.5) (MUYNCK et al., 2010).

Quando na presença de íons de cálcio, ocorre a precipitação do carbonato de cálcio (eq. 6) no meio quando se atinge um determinado nível de saturação, segundo Quian et al. (2010), essa reação ocorre na superfície da célula bacteriana, pela atração negativa da célula em relação aos íons de cálcio presentes no meio que foram acrescentados por soluções.



Hammes F. e Verstraete W (2002) detalham que a ureia quando hidrolisada forma os carbonos inorgânicos dissolvidos e amônio, e formam o carbonato de cálcio

quando se encontra no sistema íons de cálcio que serão responsáveis pela reação de formação do carbonato de cálcio. Depois de certo tempo a célula bacteriana fica completamente envolvida pelo carbonato de cálcio precipitado e a transferência de nutrientes fica debilitada, causando a morte da bactéria.

Na biocimentação, os microrganismos devem enfrentar altos índices de pH e um solução concretada de cálcio, aliado ao um meio onde a hidrólise da ureia resultara em alta concentração de amônio, gerando um ambiente não propício a vida para alguns tipos de bactérias e microrganismos em geral, portanto recomenda-se que entre os critérios de escolha destes dever levar em consideração que possua alta atividade da enzima uréase, tolerância de resistir ao um meio agressivo com amônio e íons de cálcio e não serem patogênicos.

Considerando tais critérios, avaliou-se como microrganismos potenciais para fonte de uréase, as bactérias *Sporosarcina Pasteurii* e *Proteus Vulgaris*. A primeira comumente encontrada em solos, possui um metabolismo único na hidrólise da ureia e que sobrevive em pH alcalino, sendo o ótimo de 9.25, além de possuir uma excelente atividade enzimática (WHIFFIN, 2004).

Quando se trata da biocimentação como técnica no combate a erosão, diversos autores a citam como uma de suas vantagens. Whiffin (2004), destaca em seus estudos o uso da biocimentação como técnica capaz de reduzir a permeabilidade e prevenir erosões. Ivanov e Chu (2008), fazem uma análise dos autores que citaram o uso da biocimentação no combate a erosão, demonstrando seu uso na diminuição da condutividade hidráulica de solos devida sua atividade microbiana utilizada para reduzir a formação de erosões de canais, tornando o solo mais impermeável, prevenindo o *piping*. O potencial de erosão pode ser minimizado ao preencher os vazios

do solo com reação de precipitação de calcita pelas bactérias. Pedreira (2014), também relaciona a biocimentação como solução viável para combate do *piping* pela colmatação de vazios no solo através das bactérias. Kalantary (2015), verificou que em solos com suspeita de erosão, houve aumento da resistência em um de seus estudos utilizando a solução adequada. Costa (2016), cita outros autores que também relatam o uso da biocimentação para tratamento da erosão, o mesmo com Dejong et. al. (2010), citando o uso no combate a erosão superficial.

#### 4. MÉTODO DE PESQUISA

Este trabalho tem por objetivo avaliar a eficácia de um tratamento biocimentante aplicado em um solo arenoso (areia de Osório), quando submetido a condições que levem a erosão tubular progressiva - *piping* causada por escape de água dos condutos. Então criou-se em escala reduzida um sistema capaz de simular a erosão na camada de solo e avaliar se os sistemas com o tratamento foram eficazes para evitar tal ocorrência. Como etapas do processo considerou-se:

- Etapa1: Criar em escala reduzida um sistema capaz de simular o efeito do *piping* em solos arenosos;
- Etapa 2: Conceber em 4 corpos de provas, sendo 1 sem tratamento e outros 3 com tratamento biocimentante;
- Etapa 3: Aplicar uma solução que condicionará bactérias naturalmente presentes no solo a precipitar carbonato de cálcio no meio formando uma coesão no material;
- Etapa 4: Criar situações que simulem o *piping* com a passagem de água no sistema;
- Etapa 5: Verificar a eficiência do tratamento por exumação das amostras de solo biocimentadas. A figura 1, ilustra as etapas do trabalho.

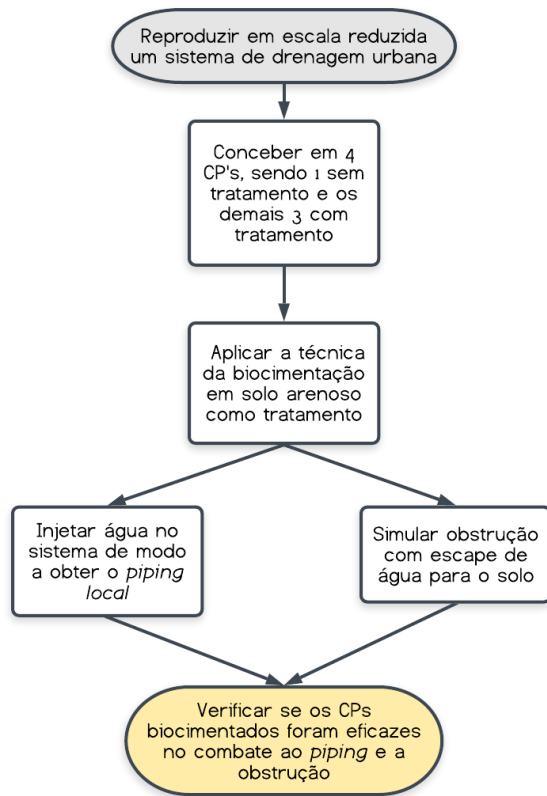


Figura 1. Etapas do experimento  
Fonte: Próprio autor, 2017

Como solo, utilizou-se a areia de Osório. Garbin (2016) e Pacheco (2001), utilizaram a solução biocimentante descrita na tabela 1. Essa solução utilizada por Dejong et. Al (2006) e Mortensen et. Al (2011), consiste na utilização de ureia a ser hidrolisada e precipitar o carbonato de cálcio, junto da formação de bicarbonato e amônio que incrementarão no aumento do pH. O cloreto de cálcio é utilizado a fim de disponibilizar íons de cálcio ao meio (MORTENSEN, et. al., 2011). A peptona e o extrato de levedura servirão como nutrientes para o crescimento bacteriano (GARBIN, 2016).

A aplicação da técnica deu-se por percolação da solução biocimentante com 14 aplicação intervaladas a cada 48 horas em um montante que seja duas vezes o volume de vazios dos corpos de prova através de um dispersor de modo a distribuir por toda a

superfície do corpo de prova e obter um solo o mais igualmente possível biocimentado em toda sua extensão (PACHECO, 2016). A tabela 1 descreve os reagentes e suas quantidades.

Tabela 1. Reagentes da solução biocimentante

Reagente	Concentração (g/L)
Peptona	2,00
Extrato de Levedura	1,00
Cloreto de Amônio	10,00
Bicarbonato de Sódio	2,12
Ureia	30,00
Cloreto de Cálcio	56,00

Fonte: Garbin, 2016

#### 4.1 Experimento prático

O sistema será composto por um corpo de prova de plástico com capacidade de 19,7 L total que receberá uma camada de solo arenoso da jazida de Osório. Na base inferior do corpo de prova tem-se uma camada de lastro brita  $\frac{3}{4}$  para escoar a solução biocimentante, acima da camada de brita, há um geotêxtil para proteger uma possível permeação da areia entre os vazios da brita. Uma tubulação de diâmetro de 20 mm com uma falha de 5 mm de diâmetro para receber um fluxo de água de modo a permitir a passagem de água para a camada de solo está inserida logo acima do geotêxtil, com a falha na metade da tubulação ao longo de seus 30 cm de comprimento. Devidamente vedado o sistema recebeu uma camada de areia de 10 cm acima da tubulação com todos os corpos de prova apresentarem índice de vazio de 0.73, compacidade relativa de 50% e umidade inicial de 10%.

Após a compactação da camada de areia, tem-se que a porosidade é de 42% e o volume dos vazios é de 3,36 L, considerando o dobro necessário para a solução biocimentante, tem-se que a aplicação a cada 2 dias de 6,72 L de solução para cada um dos corpos de prova a serem biocimentados.

A água será aplicada na tubulação com pressão exercida por bombas e um com auxílio de um manômetro na entrada do sistema para mensurar quantos metros de coluna da água serão necessários para dar-se o processo de piping e conseqüente rompimento da camada de areia. Iniciou-se com uma pressão suficiente atingir o gradiente hidráulico crítico da areia no corpo de prova branco e a partir deste valor, progrediu-se a pressão objetivando romper as camadas dos corpos de provas biocimentados. Após a tentativa de rompimento por *piping*, realizou-se também a obstrução da saída de água com conseqüente escape direto de água para o maciço de solo de modo a medir a pressão necessária para romper a camada de areia caso o *piping* por si só não seja suficiente. Outrossim aplicou-se corante na água afim de ajudar a identificar os possíveis caminhos preferenciais formados na camada de solo. A figura 2 representa o esquema do sistema.

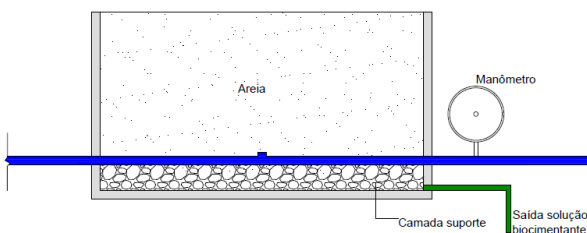


Figura 2. Representação do sistema utilizado no experimento

Fonte: Próprio autor, 2017

Os diferentes sistemas que formarão o experimento são os seguintes:

- Branco: onde haverá apenas a areia, sem nenhum tratamento aplicado.

- Tratamento biocimentante: aplicação da técnica biocimentante na camada de solo. O tratamento biocimentante será realizado em triplicata, gerando os corpos de prova CP A, CP B e CP C.

Dados técnicos do corpo de prova:

- Volume: 19,7 L;
- Volume da camada de areia:  $0,008 \text{ m}^3 = 8 \text{ L}$ ;

- Índice de vazios = 0.73;
- Compacidade relativa = 50%;
- Umidade inicial = 10%;
- Porosidade = 42%;
- Volume da solução biocimentante considerando o dobro do índice de vazios = 6,72 L;
- Comprimento da tubulação no corpo de prova = 30 cm;
- Localização da falha na tubulação = 15 cm da entrada (metade do comprimento do tubo);
- Número de injeções da solução biocimentante = 14 para cada corpo de prova a cada 48 horas.

Após a finalização da etapa de biocimentação e da aplicação da água no solo. Houve a verificação dos corpos de provas. Os quatro corpos de provas avaliados quanto ao *piping* e ao fluxo de água na camada de solo. A verificação deu-se de forma visual com a ajuda do corante utilizado na água para verificar se houve percolação de água pelo solo ou se houve a formação de falhas e trincas na camada que geraram caminhos preferenciais. As figuras 3 e 4 são os corpos de prova utilizados neste trabalho.



Figura 3. Sistemas implementados no experimento com os três corpos de prova que receberam o tratamento biocimentante

Fonte: Próprio autor, 2017



Figura 4. Corpo de prova branco  
Fonte: Próprio autor, 2017

## 5. RESULTADOS

Após a total passagem da solução biocimentante pela camada de areia, observou-se o pH e se o mesmo correspondia a elevação necessária para atender as bactérias em sua atividade biológica. O pH elevou seu valor a partir da nona aplicação da solução, a tabela 2 e a figura 5 ilustram as leituras obtidas de cada corpo de prova.

Assim como no pH o volume drenado após cada aplicação também foi observado, neste caso pode-se observar que com o passar do tempo a cada aplicação de solução biocimentante, o volume drenado acabou sendo menor que o injetado nos três corpos de prova. Em relação ao corpo de prova C, houve obstrução na tubulação de saída da solução biocimentante no último dia de aplicação, portanto não houve escoamento total da solução nesta aplicação, por isso o baixo volume drenado neste dia, a tabela 3 e a figura 6 ilustram os volumes drenados a cada dia de cada corpo de prova.

Tabela 2. pH solução efluente

Dias	CP A	CP B	CP C
1	6,55	7,01	6,72
2	6,37	6,53	6,46
3	6,65	6,97	6,82

4	6,85	6,84	6,94
5	6,81	6,72	6,74
6	6,80	7,20	8,11
7	6,83	6,70	8,00
8	7,74	7,00	8,52
9	8,32	8,49	8,37
10	9,11	9,02	9,20
11	9,10	9,18	9,25
12	9,07	9,15	9,23
13	9,08	9,21	9,19
14	9,15	9,24	9,22

Fonte: Próprio autor, 2017

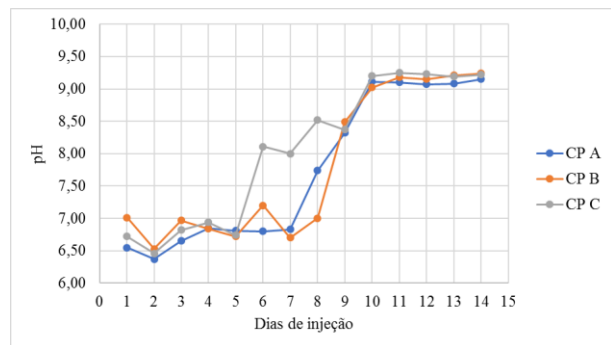


Figura 5. Evolução do pH das soluções efluentes de cada corpo de prova biocimentado

Fonte: Próprio autor, 2017.

Tabela 3. Volume solução efluente (%)

Dias	CP A	CP B	CP C
1	90	95	98
2	100	90	97
3	100	95	95
4	97	100	100
5	98	100	100
6	96	100	97
7	92	95	92
8	90	92	90
9	89	90	90
10	90	85	87
11	88	87	90
12	80	93	80
13	80	85	80
14	85	90	20

Fonte: Próprio autor, 2017



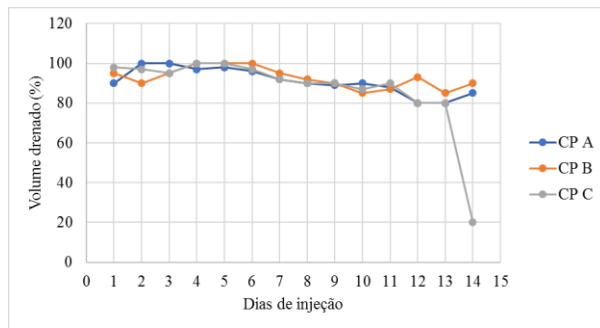


Figura 6. Volume drenado de cada corpo de prova biocimentado  
Fonte: Próprio autor, 2017.

Após a etapa da biocimentação, compreendendo 14 injeções de solução biocimentante a cada 2 dias, realizou-se a aplicação da pressão de água nos 4 corpos de prova (3 biocimentados e 1 branco), com objetivo de romper a camada de areia e realizar a leitura da pressão necessária e verificar se houve eficácia do tratamento biocimentante na mitigação do *piping*.

Iniciou-se o processo pelo corpo de prova branco, sabendo que o peso específico natural da areia com compacidade relativa de 50% no corpo de prova é de  $\gamma_n=16,90 \text{ KN/m}^3$  a uma umidade inicial de 10%, a condição saturada é de  $\gamma_{sat}=19,53 \text{ KN/m}^3$ , tem-se de tal maneira que o gradiente hidráulico crítico será de  $i_{crit} = 0,953$ , portanto a pressão de água necessária para romper a corpo de prova branco é 0,953 m.c.a. em teoria, resultado que pode ser obtido na prática a 2 m.c.a. quando medido no manômetro da entrada do corpo de prova, considerando uma perda de carga do tubo e conexões. Nesta aplicação de pressão o corpo de prova teve uma caracterização de *piping* na parte superior da falha da tubulação, sem outro caminho preferencial na camada de areia.

Após o corpo de prova branco deu-se prosseguimento com os que foram biocimentados, iniciou-se pelo corpo de prova A (CP A). Neste corpo de prova iniciou-se o processo de aplicação de pressão de água pela tubulação de modo gradual a partir de 2 m.c.a.

A pressão de água máxima disponível a ser submetida no sistema não foi suficiente para atingir o *piping* na camada de areia, porém houve rompimento com obstrução da saída da tubulação com uma pressão medida no manômetro de 30 m.c.a., o rompimento foi súbito e abrupto, foi então o único corpo de prova a apresentar este comportamento. O rompimento da camada ocorreu a uma pressão 15 vezes superior em relação a camada de areia do corpo de prova branco e com a necessária obstrução na saída para atingir o objetivo.

O corpo de prova B, foi submetido as mesmas condições do CP A, tendo uma pressão aumentada gradualmente até a atingir o *piping* e romper a camada de areia. A pressão máxima que se poderia atingir era de 30 m.c.a com o uso de 2 bombas em paralelo, no entanto esta pressão não foi suficiente para romper a camada de areia biocimentada do corpo de prova B, portanto, obstruiu-se a saída de água para aumentar a pressão interna na tubulação. O manômetro chegou a medir 60 m.c.a e conseqüente desligamento automático das bombas. Ainda nesta situação com repetição de 5 vezes da aplicação da pressão de água no sistema, não houve rompimento da camada de areia acima da falha na tubulação nem houve desenvolvimento de outros caminhos preferencias de água na camada, ou seja, com estas pressões disponíveis, não houve *piping* e nem rompimento da camada de areia, assim como não houve acumulo de partículas de areia na peneira ASTM 200.

No corpo de prova C iniciou-se o processo de aplicação de pressão de água pela tubulação de modo gradual a partir de 2 m.c.a, onde o rompimento ocorreu com 15 m.c.a, ou seja, 7,5 vezes a pressão do corpo de prova branco, nesta situação, não houve tentativa de obstruir a passagem de água na saída do corpo de prova, sendo o rompimento apenas por *piping*, também não houve desenvolvimentos de outros caminhos preferenciais nas camada

de areia, apenas aquela que foi bem definido na saída superior da falha da tubulação. A tabela 4 resume os resultados de cada corpo de prova do experimento.

Tabela 4. Resultados de pressão necessária para romper os corpos de prova (em m.c.a.)

Corpo de prova	<i>Piping</i>	Obstrução combinada com escape de água
Branco	2	NA
A	NA	30
B*	NA	60
C	15	NA

Fonte: Próprio autor, 2017

\*Corpo de prova B não rompeu, contudo, a máxima pressão disponível e aplicada foi de 60 m.c.a.

NA = não aplicado

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ante o exposto, diante do sistema concebido em laboratório para simular um sistema de drenagem urbana com conseqüente escape de água para o solo, verificou-se que neste, a biocimentação teve resultados no controle ao *piping* em solos arenosos, compreendendo um montante de 7,5 a mais de 15 vezes a pressão necessária para erodir a camada quando comparado a um sistema sem tratamento, garantindo uma eficiência nesta simulação para sistemas de drenagem urbana quando há escape de água das tubulações para o maciço de solo.

Outrossim, teve ganhos quanto a aplicação de pressão de água localizada, em uma simulação que combinava obstrução da saída de água no fluxo da drenagem urbana com escape de água para o solo. Nesta situação, os corpos de prova resistiram de 15 a mais de 30 vezes as pressões necessárias para romper um sistema biocimentado.

No entanto houve uma diferença entre os resultados, a biocimentação do corpo de prova C, não se encontrava completa no momento que se realizou o ensaio de rompimento, sendo este o que menos resistiu em comparação aos outros três, enquanto os corpos de prova B e A resistiram a pressões da ordem de 15 vezes ou superior ao gradiente hidráulico crítico, sendo 15 vezes superior para o corpo de prova A em uma simulação de obstrução combinada com escape de água para meio e mais de 30 vezes para romper a camada do corpo de prova B, sendo este corpo de prova o único a não romper com a pressão disponível máxima para execução do ensaio, chegando a 60 m.c.a de pressão medido no manômetro, mantendo-se intacto nas simulações de *piping* e de obstrução combinada com escapa de água para o solo.

## REFERÊNCIAS

ANDERSON, C. M.; DEJONG, J. T.; NELSON, D. C. Stimulating In-Situ Soil Bacteria for Bio-cementation. PEER INTERNSHIP PROGRAM, Summer 2012. University of California. Davis,2012.

ARIYANTI, D.; HADIYANTO, H. N. A. Feasibility of Using Microalgae for Biocement Production through Biocementation. *J. of Sci. and Eng. Diponegoro University* v. 2:30-33, Semarang, 2012.

BRASIL. Centro Brasileiro de Conservação da Natureza e Desenvolvimento sustentável. Técnicas de bioengenharia para revegetação de taludes no Brasil, boletim técnico 001, Viçosa, 2010.

BILHAR, B. Utilização de Bionocimentação como técnica no aumento de resistência de solo arenoso. IX SEMINÁRIO DE ENGENHARIA

GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, p.473-480, Caxias do Sul, 2017.

CASTRO, L.V.P. Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

COSTA, N. S. D. Precipitação do carbonato de cálcio por indução de enzimas como solução cimentante para estabilização do solo. 2016. 46 f. Trabalho de conclusão de curso. Curso de Engenharia Ambiental. Universidade Federal Tecnológica do Paraná. Campo Mourão, 2016.

CRUZ, P. T. 100 Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto. 2 ed. 648 p São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

CRUZ, R. C. Influência de parâmetros fundamentais na rigidez, resistência e dilatância de uma areia artificialmente cimentada. 2008. 218 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

DEJONG, J. T.; SOGA, K.; BANWART, S. A. Soil engineering in vivo: harnessing natural biogeochemical systems for sustainable, multi-functional engineering solutions. v.8, p.1–15. Journal of The Royal Interface. 2010.

DEJONG, J.T; FRITZGES, M.; NUSSTEIN K. Microbially Induced Cementation to Control Sand Responseto Undrained Shear. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering v. 32, p. 1381–1392, 2006.

GALETI, P.A. Prática de controle a erosão, Campinas: Instituto Campineiro, 1987.

GARBIN, G. R. Estudo de Biocimentação em solo arenoso. 52 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Universidade de Passo Fundo.Passo Fundo, 2016.

HAMMES F., VERSTRAETE W. Key Roles of pH and Calcium Metabolism in Microbial Carbonate Precipitation. Reviews in Enviro Sci & Biotechnol, 2002.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. Análise geológico-geotécnica e hidrogeológica dos processos erosivos situados na bacia hidrográfica do córrego Santa Maria, bairro Jardim Modelo, município de Brotas, SP. 2009. São Paulo: IPT. (Parecer Técnico 17 506 - 301). Acessado em 07 de agosto de 2017 em [http://www.ipt.br/artigo\\_tecnico/9.htm](http://www.ipt.br/artigo_tecnico/9.htm).

IVANOV, V.; CHU, J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. 2008. Rev Environ Sci Biotechnol. Singapura, 2008.

KALANTARY, F.; KAHINI, M. Evaluation of the Ability to Control Biological Precipitation to Improve Sandy Soils. Procedia Earth and Planetary Science v.15 p.278 – 284. Teerã. 2015.

LADEIRA, J. E. R. Avaliação de segurança em barragem de terra, sob o cenário de erosão tubular regressiva, por métodos probabilísticos. 2007. 210 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

MORTENSEN, B. M. et al. EFFECTS OF ENVIRONMENTAL FACTORS ON MICROBIAL INDUCES CALCIUM CARBONATE PRECEPITATION. 2011. J Appl Microbiol, v.111, p.338-349, 2011.

MUYNCK, W.; DE BELIE, N; VERSTRAETE, W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: a review. EcolEng, v. 36, p. 118-136, 2010.

PACHECO, V. L. Avaliação da resistência de solo arenoso biocimentado através de ensaio de placa. 2017. IX SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, p.102-109, 2017.

PEDREIRA, Rita Romeu. Bio – Cimentação de Solos Arenosos para Melhoramento das suas Características Hidro –Mecânicas. 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2014.

QIAN, C. et al. THEORY OF MICOBIAL CARBONATE PRECIPTATION AND ITS APPLICATION IN RESTORATION OS CEMENT-BASED MATERIALS DEFECTS. Chin J Chem, v.28 p. 847-857, 2010.

SILVA, A. J. N.; CARVALHO, F. G. Coesão e resistência ao cisalhamento relacionados a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo de tabuleiro costeiro. Scielo, Macaíba, n. 31, p.853-862, 2007.

SILVA, J. K. Identificação de instabilidades hidráulicas em sistema de drenagem urbana. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia xde Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

THE RESOURCE, North Augusta. When Good Pipes Go Bad – *Structural Failure Sinkholes*. 2010. Storm Management Department, North Augusta, 2010.

Whiffin Victoria S. Microbial CaCO<sub>3</sub> Precipitation for The Production of Biocement. 2004. 162 f. Tese (PhD - Doutorado), School of Biological Science & Biotechnology, Murdoch University. Perth, 2004.