

TRATAMENTO POR BIOCIMENTAÇÃO PARA ESTABILIZAÇÃO SUPERFICIAL DE UM TALUDE REAL

Biocementation treatment to stabilize the surface of a real slope

Rafaela Cardoso^a, Mário Oliveira^a, Miguel Q. Cruz^b, Isabel Gonzalez^b, Ana Teresa Rodrigues^c, Leslie Sapin^d e Annette Esnault-Fillet^d

^a CERIS/Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

^b Brisa Gestão de Infraestruturas, Portugal

^c RODIO Portugal, Portugal

^d Soletanche-Bachy, França

RESUMO – No tratamento de solos por biocimentação promove-se a precipitação de carbonato de cálcio (biocimento) com recurso a agentes biológicos tais como bactérias ou enzimas. O tratamento superficial de solos arenosos para aumentar a resistência ao ravinamento é uma nova aplicação, que está a ser investigado no IST no âmbito de um projeto financiado pela FCT I.P. (ref. PTDC/ECI-EGC/1086/2021). Este tratamento foi efetuado num talude de escavação em solo arenoso da autoestrada A13 gerida pela BRISA. O tratamento foi efetuado pela Rodio Portuguesa e a Soletanche-Bachy, que forneceu as bactérias. Neste artigo apresentam-se os resultados de um ano de monitorização do tratamento deste talude para estudar a durabilidade, através da medição das quantidades de carbonato de cálcio medidas logo após o tratamento e depois das primeiras chuvas intensas. Os resultados são animadores e confirmam a adequabilidade deste tratamento para evitar ravinamento. Trata-se do primeiro caso de estudo português em biocimentação, que se espera que ajude a promover esta técnica para melhoramento de terrenos como uma alternativa mais sustentável do que as soluções tradicionais.

ABSTRACT –The precipitation of calcium carbonate (biocement) by using biological agents such as bacteria or enzyme is promoted during soil treatment by biocementation. A novel application is treating soil surface to improve strength against ravine formation, which is being investigated at IST under a project founded by FCT I.P. (ref. PTDC/ECI-EGC/1086/2021). This treatment was done in a slope excavated on a sandy formation at A13 motorway managed by BRISA. The treatment was done by Rodio Portuguesa and Soletanche-Bachy, who supplied the bacteria. The slope was monitored for more than one year to study the durability of the treatment by measuring the amount of calcium carbonate after several rain periods, and the results are presented in this paper. The results are encouraging and confirm the suitability of the treatment against ravine formation. This is the first Portuguese case-study on biocementation, which is expected to help promoting this technique for soil improvement, as a technique more sustainable than traditional solutions.

Palavras Chave – erosão superficial, biocimento, solo arenoso.

Keywords – surface erosion; biocement, sandy soil.

E-mails: rafaela.cardoso@tecnico.ulisboa.pt (R. Cardoso), miguel.cruz@brisa.pt (M. Cruz), isabel.gonzalez@brisa.pt (I. Gonzalez), ana.rodrigues@rodio.pt (A. Rodrigues), leslie.sapin@soletanche-bachy.com (L. Sapin), annette.esnaultt@soletanche-bachy.com (A. Esnault-Fillet)

ORCID: orcid.org/0000-0002-4551-3868 (R. Cardoso), orcid.org/0000-0003-2350-1708 (A. Esnault-Fillet)

1 – INTRODUÇÃO

A biocimentação é uma técnica de melhoramento de terrenos ambientalmente sustentável, alternativa ao uso de ligantes hidráulicos tais como cal ou cimento. Baseia-se numa reação bioquímica que não necessita de ligantes hidráulicos, sendo a energia consumida na produção das bactérias e reagentes baixa, assim como as emissões de CO₂, porque o seu fabrico não envolve combustão (Gat et al. 2017; Patil et al., 2021). Tem ainda a vantagem de produzir pequenas quantidade de resíduos (Pei et al. 2013; Tarczewski, 2015). Do ponto de vista ambiental apresenta algum potencial de contaminação do solo com nitratos, que se corrige com lavagem abundante com água (Lee et al. 2019). Do ponto de vista económico, apesar de a ureia usada como solução de alimento ser muito abundante, e por isso muito barata (Terzis e Laloui, 2019), é uma técnica mais cara do que as soluções tradicionais em que se injetam ligantes hidráulicos, tais como cimento, por causa da necessidade de produzir bactérias em grandes quantidades e este procedimento ainda não ser prática corrente (Suer et al. 2009; Bhutange et al. 2020).

O tratamento consiste em usar agentes biológicos, nomeadamente bactérias ou enzimas, para promover a precipitação de carbonato de cálcio (biocimento). O carbonato de cálcio precipitado é responsável pelo aumento da resistência e da rigidez do solo devido às ligações que estabelece entre as partículas, e por alguma diminuição da permeabilidade causada pelo efeito de preenchimento parcial dos vazios. As melhorias são proporcionais à quantidade de biocimento precipitado, que depende das condições de tratamento e da granulometria e do volume dos vazios do solo (Al Qabany e Soga, 2013). Assim, consoante a duração e dosagens aplicadas, é possível dimensionar este tratamento para evitar sobredimensionamento. Esta é outra forma de promover a sustentabilidade.

Já são várias as aplicações deste tratamento em casos reais, nomeadamente para melhoramento do solo em fundações e em escavações (Esnault-Fillet et al., 2020), aumentar a resistência à liquefação, estabilização de dunas de areia para resistir à erosão eólica (Gomez et al., 2015), aumentar a resistência à erosão interna em diques (Chek et al., 2021), e melhorar o potencial de colapso (Cardoso et al., 2023).

As principais desvantagens deste tratamento são a necessidade de produzir dosagens elevadas de bactérias e solução de alimento, e à dificuldade em conseguir homogeneidade em volume do solo tratado. Estas desvantagens minimizam-se recorrendo a enzimas em vez de bactérias, e fazendo mistura no terreno ou aumentando os pontos de injeção. A maior dificuldade em conseguir homogeneidade do tratamento em volume está associada aos métodos usados para a sua aplicação. Tal como quando se injeta cimento através de jet grouting, o biocimento fica concentrado em torno dos injetores e a sua concentração diminui com a distância.

Os solos arenosos são os mais adequados para este tratamento porque o volume de vazios é compatível com a dimensão das bactérias (Phadnis e Santamarina, 2011) e têm permeabilidade elevada para facilitar a infiltração da solução de tratamento. Isto porque a injeção deve ser feita com relativamente baixa pressão (máximo 2 MPa) (Van Paassen et al, 2010), para permitir a aderência das bactérias e impedir a sua lavagem quando se procede à injeção posterior de solução de alimento. O equipamento usado para este tratamento é o usado em várias aplicações geotécnicas, consistindo em reservatórios para a solução de tratamento, injetores (baixa pressão) e controladores de caudais. Os protocolos de tratamento já estão relativamente bem definidos e patenteados, e consistem basicamente na definição das dosagens de bactérias (1×10^8 células/ml), concentrações de ureia e de cálcio (geralmente 0,5 M) e frequência de alimentação. Os custos, aspetos ambientais, e também o dimensionamento de soluções para obter uma dada melhoria para uma determinada granulometria ainda são temas correntes de investigação, assim como a durabilidade do tratamento (Suer et al. 2009).

Do ponto de vista ambiental, uma das preocupações com este tratamento prende-se com a composição da solução de tratamento. Geralmente usa-se cloreto de cálcio como fonte de cálcio, e na hidrólise de ureia também há a produção de amónia. Para tal é necessário proceder à lavagem com água abundante após o tratamento, para remover os cloretos e a amónia. Tal também permite

remover solução de alimento que não tenha sido consumida, parando a reação biológica e garantindo que não interfere com outras bactérias do ecossistema. A lavagem final com água provou ser eficiente em vários casos estudo (Gat et al. 2017; Lee et al. 2019), eliminando esta preocupação.

Do ponto de vista de durabilidade, um dos aspetos geralmente estudados prende-se com as condições necessárias para precipitar carbonato de cálcio sob a forma de calcite, que é insolúvel em fluidos com pH superior a 6 (Pinto e Cardoso, 2023). As outras formas minerais do carbonato de cálcio são a vaterite e a aragonite, ambas solúveis. A exposição do solo tratado a ciclos de molhagem-secagem é a forma mais usual de estudar a durabilidade deste tratamento (Salifu et al., 2016; Shahin et al. 2020; Gowthaman et al. 2021), porque pode ser responsável pelo destacamento de partículas, ou de agregados de partículas quando a quantidade de biocimento precipitado é baixa (inferior a 2%) (Feng e Montoya, 2015).

A dificuldade em promover a homogeneização sugere que o tratamento poderá ser eficaz se aplicado em superfícies formando capas de solo mais rígido e mais resistente. Juntamente com os bons resultados dos estudos de erosão eólica e de durabilidade sob ciclos de molhagem-secagem, surgiu a ideia de usar esta técnica para aumentar a resistência ao ravinamento de taludes. Esta técnica provou ser eficiente para este objetivo em ensaios de laboratório realizados anteriormente no IST (Borges et al. 2021; Fernandez e Cardoso, 2022).

O tratamento superficial de solos arenosos para aumentar a resistência ao ravinamento de taludes considerando a durabilidade do tratamento está a ser investigado no Instituto Superior Técnico, IST, no âmbito de um projeto financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT I.P.) (ref. PTDC/ECI-EGC/1086/2021). Este tratamento foi efetuado num talude de escavação em solo arenoso da autoestrada A13 gerida pela BRISA, com o objetivo de evitar ravinamento provocado pela chuva. Foi efetuado pela Rodio Portugal, do grupo Soletanche-Bachy, detentoras de tecnologia capaz de injetar no solo os fluidos de tratamento com bactérias. Este talude está a ser monitorizado ao longo do tempo para estudar o seu desempenho, tal como se descreve em seguida.

2 – CASO DE ESTUDO

O talude tratado é um dos taludes de escavação da autoestrada A13 que atravessam formações arenosas que exibem ravinamento. Para além do tipo de solo, os restantes critérios de seleção basearam-se na geometria (inclinação máxima de 30° e altura média inferior a 6m), acessibilidade pelo topo e base, disponibilidade de espaço para estaleiro, e o imperativo de manter a operacionalidade da autoestrada durante os trabalhos.

O talude localiza-se no km 37, no sentido Marateca - Almeirim. Atravessa uma formação arenosa na sua totalidade, ainda que a espessura da camada de areia seja variável em altura, com um valor mínimo variável entre 50 a 70 cm numa faixa horizontal na sua base, com cerca de 2 m de largura. Tem inclinação entre 28° e 30° e altura média de 5 m, e não apresenta sinais muito marcados de ravinamento (Figura 1a). A distância entre o separador e a berma do talude do aterro da autoestrada tem cerca de 3 m de largura, com mais 3 m até ao sistema de drenagem longitudinal no pé do talude, e por isso a berma é larga o suficiente para instalar um pequeno estaleiro. No topo, o talude tem um caminho antes de uma cerca de limite de propriedade e está próximo de uma passagem superior, pelo que também é acessível. Finalmente, está num troço em que a supressão da berma é visível para os condutores. Estas condições são idênticas às que se adotariam para outro tipo de soluções de estabilização de taludes recorrendo a injeção.

Segundo a informação dos relatórios geológico-geotécnicos relativos à A13 fornecidos pela BRISA, no local identificam-se três formações geológicas descritas no Quadro 1 (So, Q e MP). Os dados do ensaio SPT (N_{SPT}) aí identificados foram obtidos numa sondagem realizada próximo do talude tratado. As formações atravessadas pelo talude tratado são a So e a Q, ambas arenosas, logo indicadas para este tratamento.

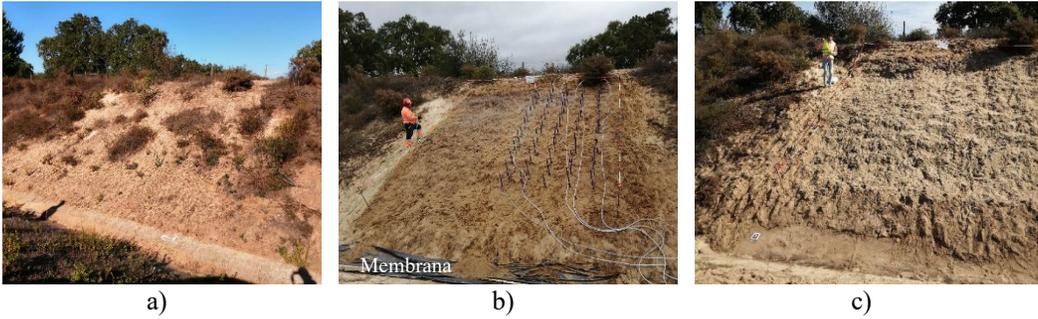


Fig. 1 – Talude tratado: a) antes do tratamento e da decapagem superficial; b) durante o tratamento; c) três meses depois do tratamento.

Foram recolhidas amostras de solo até 0,50 m de profundidade para caracterização geotécnica. *In situ*, o peso volúmico seco médio era de $15,5 \text{ kN/m}^3$. A curva granulométrica do solo superficial apresenta-se na Figura 2. Segundo a classificação unificada de solos (ASTM D2487-11) trata-se de uma areia bem graduada, SW, sem cascalho e com 2% de finos não plásticos. A densidade das partículas sólidas (G_s) é 2,59, um valor baixo devido à presença de pequenas raízes. Os minerais presentes, determinados por difração de raios-X, são essencialmente quartzo e microclina. O coeficiente de permeabilidade medido *in situ* foi de $2,4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. A resistência ao corte foi medida em amostras reconstituídas em laboratório obtendo-se o ângulo de resistência ao corte de 36° . Trata-se de um valor elevado, explicado pela presença de pequenas raízes que conferem ao solo alguma resistência. O pH do solo não foi medido porque não é relevante.

Quadro 1 – Dados dos relatórios geológico-geotécnicos.

Camada	Espessura aprox. (m)	Descrição	N _{SPT}
So	0,6	Areia siltosa fina castanha, com raízes	-
Q	2,4	Areia amarela media a grossa, com blocos de cascalho dispersos e alguns finos	17
MP	3,0	Argila siltosa rija castanha e cinzenta	23

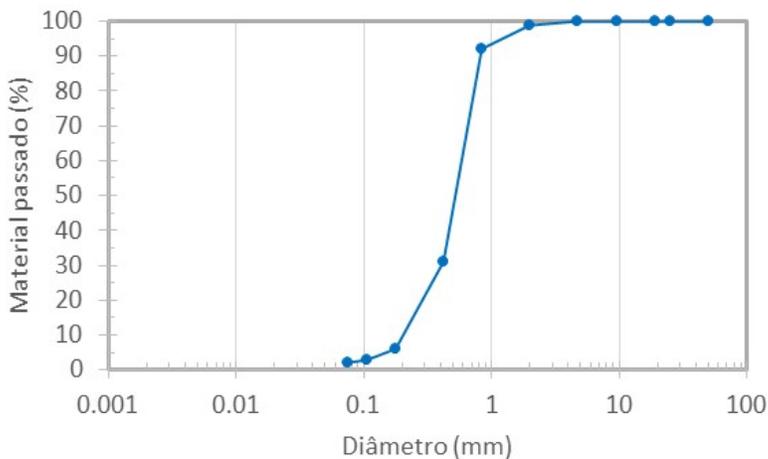


Fig. 2 – Curva granulométrica do solo superficial (da formação So).

3 – TRATAMENTO DO TALUDE POR BIOCIMENTAÇÃO

3.1 – Biocimentação

O processo de biocimentação ocorre quando se adiciona ao solo as bactérias ureolíticas e solução de alimento contendo ureia e cálcio. A ureia é hidrolizada pela enzima urease presente nas bactérias, de onde resulta o íon carbonato, CO_3^{2-} (equação 1). Na presença de íons cálcio (Ca^{2+}) ocorre a precipitação de carbonato de cálcio CaCO_3 (equação 2), que corresponde à formação de sólido (\downarrow). A enzima é um catalizador da reação química de hidrólise da ureia, aumentando a sua velocidade em cerca de 10^{14} vezes (Al Qabany e Soga, 2013).



Foram usadas bactérias *S. pasteurii*, que são não patogénicas e existem naturalmente no solo. As quantidades aplicadas são muito superiores às bactérias existentes, o que as torna dominantes durante o tratamento e que assegura que não se está a alimentar outros organismos que possam ser prejudiciais ao ecossistema. As bactérias adicionadas ficam inativas quando deixam de ser alimentadas, controlando-se assim a sua proliferação e eliminando-se riscos de contaminação futura.

Trata-se de uma reação praticamente instantânea, pelo que não há acumulação de biocimento precipitado se não se adicionar mais alimento. Se a quantidade de biocimento diminuir no tempo é porque houve lavagem, e por esse motivo é que se justifica monitorizar a quantidade de biocimento no tempo para medir a durabilidade do tratamento.

3.2 – Protocolo de tratamento

Este tratamento foi efetuado no talude da A13 em Setembro de 2022 e teve cinco dias de duração. A área tratada teve cerca de 5 m de largura e 6 m de altura, tendo-se deixado por tratar uma faixa horizontal com 1 m de largura na base por ser a zona em que a camada de areia tem menor espessura e por motivos operacionais. O talude foi dividido em duas faixas verticais com larguras idênticas (cerca de 2,5 m cada uma), para testar duas técnicas distintas: rega, e rega e injeção superficial (Figura 3). A rega consiste num tratamento superficial, atuante na camada superior com 0,08 a 0,10 m de profundidade. A injeção foi efetuada através de tubos não perfurados instalados numa malha quadrada 0,5 m \times 0,5 m e com a profundidade de 0,5 m (Figura 1b) e pretende atingir maiores profundidades do que a rega, mas ainda ser superficial. O tratamento por injeção é o mais tradicional quando se pretende reforçar o solo, mas para aumentar a resistência à erosão basta um tratamento mais superficial porque o que se pretende é formar uma crosta mais resistente. Para além de ser o suficiente para se conseguir esta crosta, a rega superficial pode tornar também o tratamento mais homogêneo na área do talude, o que é desejável para o pretendido.

A Figura 4 mostra fotografias do estaleiro, em que se vê a supressão da berma e os equipamentos da Rodio Portugal usados para a mistura e injeção dos fluidos de tratamento. Consistem num contentor para armazém e escritório, um gerador de eletricidade, um minifrigorífico para guardar as bactérias, reservatórios com a água necessária para produzir os vários fluidos de tratamento, uma misturadora, e bombas para encher a misturadora e para a injeção do tratamento, juntamente com os medidores de caudal e as respetivas manguerias. Com a exceção do frigorífico, todos estes equipamentos são usados em várias aplicações, por exemplo para misturar e injetar caldas de cimento.

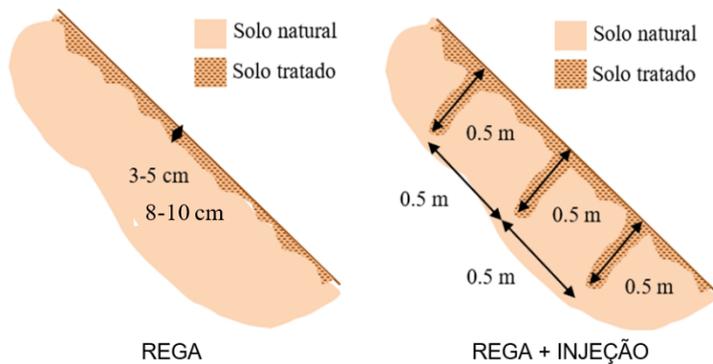
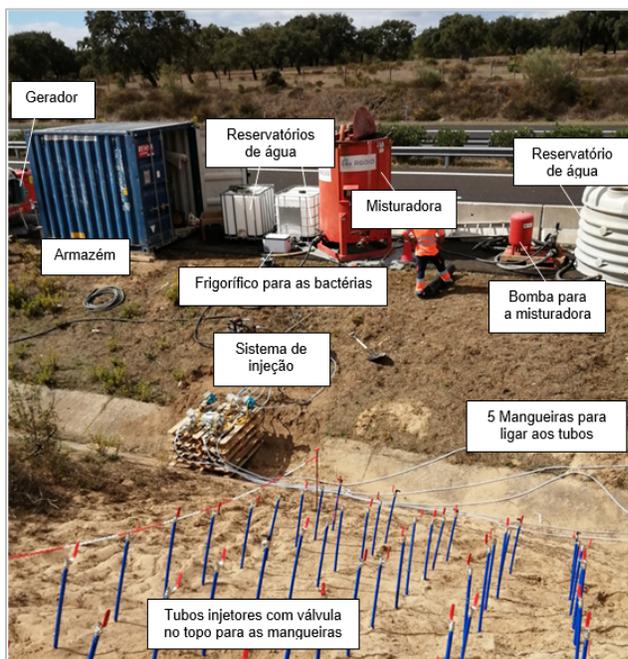


Fig. 3 – Tratamentos adotados.



a)



b)

Fig. 4 – Tratamento do talude da A13: a) Vista global; b) Estaleiro da obra.

No primeiro dia, após a supressão da berma, foi instalado o estaleiro e realizada a decapagem superficial, com regularização da superfície do terreno. O segundo dia foi o primeiro dia do tratamento. Após a instalação dos tubos para injeção e dos plásticos protetores da berma para recolha dos efluentes, aplicou-se apenas rega em toda a face do talude. No segundo e terceiro dias do tratamento aplicou-se rega seguida de injeção na faixa de talude reservada para esse efeito. No quarto dia de tratamento (quinto dia de intervenção) procedeu-se à lavagem com água, por rega e injeção, com recolha dos efluentes na membrana plástica preta instalada na base do talude sobre o sistema de drenagem (Figura 1b).

Para o tratamento, primeiro adicionaram-se as bactérias ao solo, aguardou-se cerca de uma hora e depois adicionou-se a solução de alimento (0,5 M de ureia e 0,5 M de um reagente com cálcio). As bactérias e os reagentes da solução de alimento foram misturados com água antes da respetiva injeção. As bactérias foram produzidas pela Soletanche-Bachy, sob a forma liofilizada, sendo hidratadas com água antes da sua aplicação no terreno. Os reagentes da solução de alimento também foram misturados com água antes da injeção. Com este tratamento estava prevista a precipitação de 4% de carbonato de cálcio, obtida em ensaios prévios de provetes do mesmo solo, realizados em laboratório pela Soletanche-Bachy. A informação relativa ao pH das soluções e o seu controlo é confidencial.

A pressão máxima da injeção foi 2 bar, com um caudal máximo de 300 l/h, que é relativamente baixo. As injeções foram aplicadas em cada fiada horizontal, que tem 5 tubos, a começar no topo do talude. As mangueiras eram ligadas a cada tubo injetor antes de começar a injeção, fechando-se a válvula superior do tubo quando esta terminava e se retirava a mangueira para ser colocada no tubo da fiada abaixo. A injeção de cada tubo foi controlada individualmente.

4 – MONITORIZAÇÃO E ENSAIOS REALIZADOS

4.1 – Monitorização

A monitorização foi efetuada durante e após o tratamento, no total de 8 campanhas. As campanhas foram realizadas durante 18 meses, com visitas trimestrais ou depois de ter ocorrido precipitação intensa. A análise desta evolução permitiu obter informações sobre a durabilidade do tratamento no período em análise.

Durante o tratamento, o objetivo foi confirmar a atividade bacteriana, e para tal foram recolhidos fluidos pela Soletanche-Bachy para a medição desta atividade. Após o tratamento, a monitorização consistiu na observação do talude, com fotografias tiradas com um drone, e recolha de amostras superficiais para medir a percentagem de carbonato de cálcio ao longo do tempo. Em paralelo foram observadas zonas vizinhas não tratadas, para comparação do comportamento com e sem tratamento.

As amostras superficiais para a medição do carbonato de cálcio ao longo do tempo e para análise mineralógica foram recolhidas na superfície do talude, a 3 cm de profundidade. A amostragem foi realizada numa grelha com dimensão 5×5 definida para cobrir a superfície tratada do talude, ilustrada na Figura 5. As amostras recolhidas foram pequenas para evitar destruir a camada superficial do talude, já que não podiam ser recolhidas exatamente no mesmo local.

4.2 – Percentagem de carbonato de cálcio

A percentagem de carbonato de cálcio foi medida no laboratório através de ensaios de lixiviação com ácido clorídrico (0,5 M), porque o ácido dissolve o carbonato de cálcio. Esta percentagem é dada por:

$$\%CaCO_3 = \frac{m_{antes} - m_{depois}}{m_{antes}} \quad (3)$$

onde m_{antes} e m_{depois} são o peso seco do solo antes e após a lavagem com ácido.

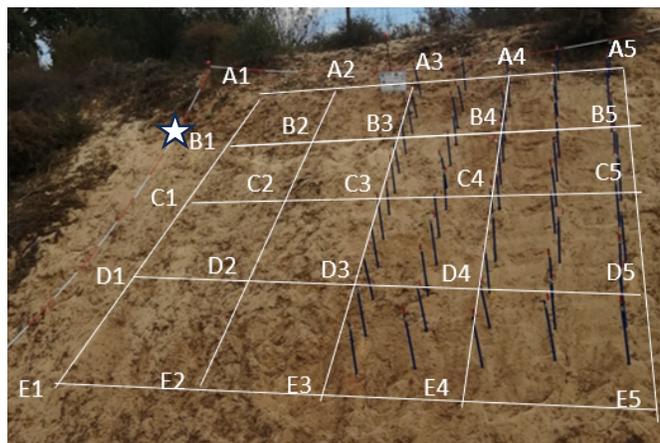


Fig. 5 – Grelha para a recolha de amostras durante as campanhas de monitorização e onde se realizaram os ensaios PDL, com recolha de amostras em profundidade. A estrela identifica o local onde se realizou o ensaio PDL fora da zona tratada.

4.3 – Permeabilidade saturada

A permeabilidade saturada antes e 1 mês após o tratamento foi medida *in situ* com um ensaio de carga variável realizado em dois locais diferentes (próximo das posições D2 e D4, identificadas na Figura 5). Os tubos de aço inoxidável, com 0,07 m de diâmetro e 0,20 m de altura, foram cravados 0,10 m no terreno de forma a medir a permeabilidade do solo. Foram cheios com 0,10 m de água da torneira, tendo-se registado o intervalo de tempo necessário para a altura de água diminuir 0,01 m. Para se ter a certeza de que solo estava saturado, efetuaram-se mais de três medições e só se considerou o último valor por ser semelhante ao valor anterior.

4.4 – Penetrómetro dinâmico ligeiro (PDL)

No final do primeiro ano após o tratamento foram realizados ensaios com penetrómetro dinâmico ligeiro (PDL), tipo Panda, medindo-se o número de golpes necessários para ocorrer 0,15 m de penetração. Os ensaios foram realizados fora da área tratada (localização identificada com uma estrela na Figura 5) e nas posições B2 e B4, que se localizam respetivamente nas zonas onde o tratamento foi efetuado com rega e com rega e injeção. Nas posições B2 e B4 foram também recolhidas amostras até à profundidade de 0,50 m para determinação da percentagem de carbonato de cálcio em profundidade. Estes ensaios foram realizados um ano após o tratamento, tendo provocado perturbação da superfície de talude e a interrupção das campanhas de recolha superficial das amostras para elaborar mapas da distribuição superficial do biocimento.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Permeabilidade saturada

A permeabilidade média medida antes do tratamento foi $2,4 \times 10^{-4}$ m/s, tendo diminuído para $6,3 \times 10^{-5}$ m/s na zona regada (medição perto da posição D2), e para $5,5 \times 10^{-5}$ m/s na zona regada e injetada (medição perto da posição D4). Este resultado indica que houve colmatção dos vazios com o tratamento, mas ainda assim o solo manteve ainda bastante capacidade de infiltração. Apesar de se ter verificado um valor ligeiramente menor na zona regada e injetada do que na zona só regada, o número reduzido de leituras não permite diferenciar os efeitos dos dois tipos de tratamento.

5.2 – Distribuição de biocimento na superfície

O Quadro 2 apresenta as percentagens de carbonato de cálcio medidas nas amostras recolhidas (grelha na Figura 5, sendo as colunas identificadas por números e as linhas por letras) na semana a seguir ao tratamento. O valor medido na posição B4 corresponde a um torrão de material tratado e que tinha cerca de 20% de biocimento. Consta-se que os valores ultrapassam 4% em quase todas as amostras analisadas, que era o pretendido com o tratamento.

Quadro 2 – Percentagens de carbonato de cálcio medidas uma semana após o tratamento.

Posição	1	2	3	4	5	Média
A	1,4	4,3	6,6	5,5	3,8	4,3
B	2,5	6,2	4,4	20,0*	3,6	4,2
C	4,4	3,8	3,9	3,9	2,2	3,7
D	4,6	2,6	3,2	2,6	2,9	3,2
E	2,5	4,7	5,3	4,2	4,5	4,2
Média	3,1	4,3	4,7	4,1	3,4	-

* Valor anómalo medido num torrão recolhido nesta posição, não representativo

Com os dados recolhidos nos vários pontos para as várias campanhas de monitorização traçaram-se os mapas de distribuição de carbonato de cálcio na longo da face do talude tratado, e os perfis da evolução dos valores ao longo do tempo em cada posição. Os mapas com as distribuições da percentagem de carbonato de cálcio medidas nas amostras recolhidas na superfície do talude tratado apresentam-se na Figura 6, para 1 e 12 meses após o tratamento. Cardoso et al. (2024) apresentam outros perfis complementares a estes. Observa-se uma grande heterogeneidade de valores, não sendo possível ver diferenças entre os dois tipos de tratamento. Tal pode ser porque foi efetuada rega nos dois casos e as amostras foram recolhidas muito superficialmente. Observa-se alguma acumulação de biocimento na zona central do talude, provavelmente porque a rega foi efetuada pelas faixas verticais laterais fora da zona a tratar (ver Figura 1b).

A evolução dos valores medidos nos vários pontos ao longo do alinhamento horizontal C, a meio do talude, apresenta-se na Figura 7. Os valores de percentagem de biocimento em cada ponto variam ao longo do tempo, mas oscilam em torno do valor médio de 4%, que é a percentagem pretendida com o tratamento.

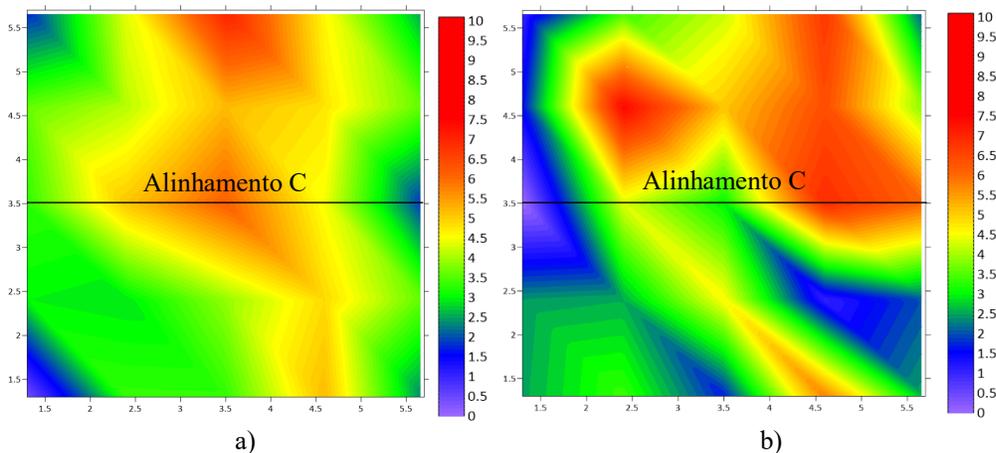


Fig. 6 – Mapas com a distribuição superficial de biocimento após o tratamento: a) 1 mês (novembro 2022); b) 12 meses (outubro 2023).

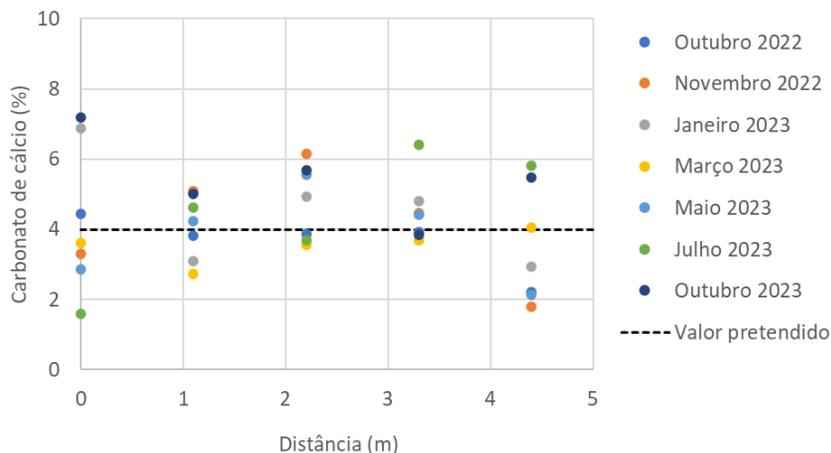


Fig. 7 –Evolução temporal da distribuição superficial de biocimento no alinhamento horizontal a meio do talude tratado (alinhamento C).

A precipitação do biocimento é uma reação rápida porque ocorre assim que as bactérias entram em contacto com a solução de alimento, e pára logo que as bactérias deixam de ser alimentadas. Espera-se assim que as quantidades medidas sejam idênticas uma semana ou um ano após o tratamento se não houver dissolução do biocimento no tempo. Com base nos dados obtidos da monitorização deste talude verificou-se que estas quantidades permaneceram constantes. Também nesta análise é possível constatar que as maiores percentagens encontram-se na zona central e onde foi efetuado tratamento por rega e injeção, no entanto continuam a ser elevadas na zona onde só houve rega.

A dispersão dos valores na área tratada explica-se pelo tratamento ter sido efetuado por rega em toda a superfície do talude, e ainda porque a camada superficial de solo com biocimento foi perturbada pelo processo de recolha das amostras nas várias campanhas de monitorização efetuadas. Nas visitas à obra é também possível observar crostas de material tratado, estando o biocimento perfeitamente identificado por ser esbranquiçado e contrastar com a areia amarela. Nestes agregados a percentagem de carbonato de cálcio atinge valores muito altos.

A Figura 8 apresenta várias imagens de um destes agregados, que tinha 22% de carbonato de cálcio. É visível a sua coesão e as ligações entre as partículas, tanto com o microscópio ótico como com o microscópio eletrónico. Nas imagens deste último vêem-se os pequenos cristais de carbonato de cálcio, em forma cúbica e de esferas, assim como uma ligação entre várias partículas. Pela análise mineralógica (difração de raios-X) comprovou-se que este precipitado é maioritariamente calcite, que é a forma mineral mais estável de carbonato de cálcio.

5.3 – Distribuição de biocimento em profundidade

A percentagem de carbonato de cálcio medida nos primeiros 0,50 m de profundidade, em dois perfis verticais situados próximos dos locais B2 e B4, apresenta-se na Figura 9a). Verifica-se que os valores medidos em ambos são parecidos nos primeiros 0,20 m, o que pode corresponder à profundidade de infiltração dos fluidos da rega. A maior percentagem de carbonato de cálcio foi obtida a 0,30 m de profundidade na zona regada, e a 0,50 m de profundidade na zona regada e injetada, o que é aproximadamente a profundidade dos tubos de injeção. Será preciso considerar também que parte da variação encontrada é explicada pela heterogeneidade natural do solo em profundidade, à qual acresce a variabilidade natural associada a qualquer ensaio.

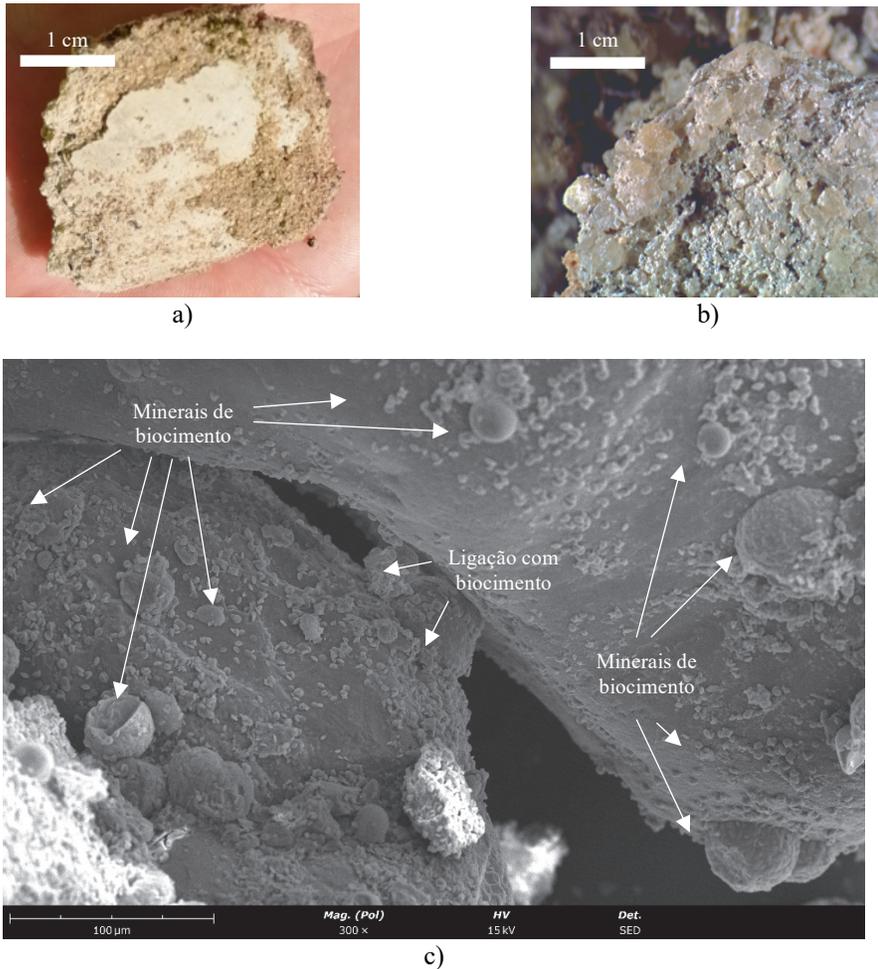


Fig. 8 – Material tratado onde se vê a presença de biocimento (cerca de 22%):
 a) Fotografia no terreno; b) Fotografia de microscópio ótico;
 c) Fotografia de microscópio eletrônico.

5.4 – Ensaios de penetrómetro dinâmico ligeiro

Os resultados dos ensaios com o penetrómetro dinâmico ligeiro apresentam-se na Figura 9b, correspondentes aos ensaios fora da área tratada (localização identificada com uma estrela na Figura 5) e nas posições B2 e B4 (zonas onde o tratamento foi efetuado com rega e com rega e injeção). Estes perfis estão coerentes com os perfis da percentagem de carbonato de cálcio em profundidade nos primeiros 0,30 m, pelo que o aumento da resistência na zona tratada pode ser explicado pela presença de carbonato de cálcio resultante da infiltração do tratamento durante a irrigação.

No perfil B2 observou-se um pico acentuado a 0,40 m, mas tal deve-se provavelmente à presença de uma raiz, que não foi saneada antes do tratamento. No perfil B4, na zona regada e injetada, a resistência à penetração continuou a aumentar até 0,70 m, com novo aumento a 0,90 m.

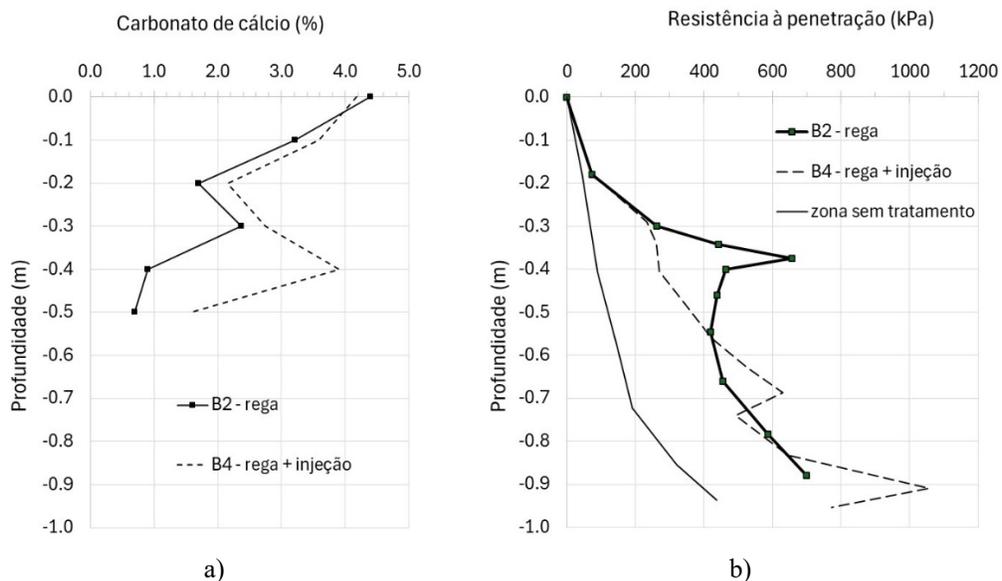


Fig. 9 – Distribuição em profundidade: a) Percentagem de biocimento; b) Resistência à penetração.

No perfil da zona não tratada é visível a transição entre duas camadas diferentes, aproximadamente a 0,70 m de profundidade. A camada mais profunda corresponde a um solo mais resistente, com mais argila. Nos perfis das zonas tratadas esta transição entre materiais diferentes também é visível pelo aumento da resistência à penetração a essa profundidade. A presença de argila poderá explicar a acumulação de fluido de tratamento na transição entre as duas camadas. Abaixo dos 0,70 m de profundidade, em todos os perfis, o incremento de resistência pode ser explicado pela heterogeneidade natural do solo.

O tratamento de biocimentação aumentou a resistência à penetração do solo, que duplicou a 0,30 m de profundidade após o tratamento por rega. Pode-se fazer corresponder este aumento à acumulação de carbonato de cálcio nos primeiros 0,30 m devido a infiltração dos fluidos de tratamento devido à rega superficial efetuada em toda a área do talude. Na zona de injeção, a 0,70 m de profundidade, a resistência foi 3 vezes superior aos valores medidos sem o tratamento. Este aumento pode corresponder a uma nova acumulação de fluidos de tratamento, próxima dos 0,50 m de profundidade que era onde estavam os tubos de injeção.

Considerando apenas o tratamento com rega, embora a permeabilidade do solo seja alta, a espessura da camada tratada é reduzida, principalmente porque o processo de precipitação é um processo rápido. Adicionalmente, o solo não estava saturado antes da primeira injeção dos fluidos de tratamento, e tal contribuiu para a sua concentração superficial.

6 – EFEITOS DO TRATAMENTO NO RAVINAMENTO

Durante o tratamento observou-se a formação de pequenas ravinas, com acumulação de fluidos e de solo na base do talude, na faixa horizontal inferior que aí foi colocada para servir de coletor. O talude ficou exposto às ações atmosféricas depois do tratamento. No final de novembro de 2022 houve uma forte chuvada e o material mais solto foi removido, mas era proveniente essencialmente das faixas laterais de acesso ao talude onde o solo não foi tratado, e não da zona tratada. Embora tenham ocorrido episódios de forte erosão na lateral da área tratada nos diversos períodos de chuva

forte, as ravinas formadas inicialmente na área tratada durante o tratamento parecem estar estáveis. Estas ravinas concentram-se na faixa horizontal inferior do talude, que não foi tratada, por ser a zona em que a camada de areia é mais fina.

As ravinas e o aparecimento de vegetação superficial podem ser observados nas várias fotografias tiradas durante o período de monitorização e que se apresentam na Figura 10. A cor da superfície do talude é diferente nos vários casos porque o solo tinha teores em água diferentes e as fotografias foram tiradas em horas do dia diferentes.

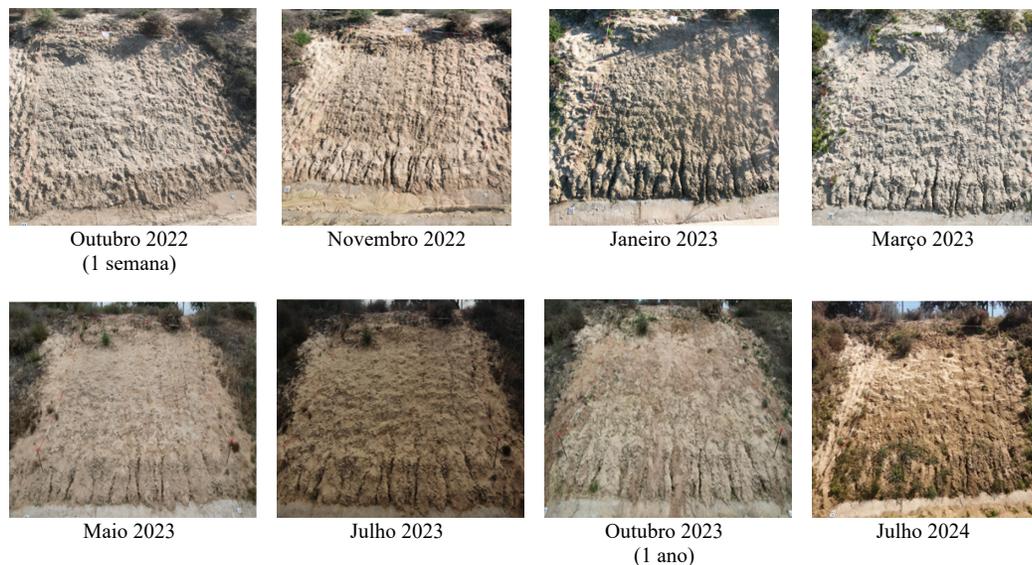


Fig. 10 – Evolução da superfície do talude ao longo do tempo de monitorização.

Nas várias visitas após o tratamento verificou-se que a superfície do talude se mantém estável. Apesar de ter nascido um arbusto no canto superior esquerdo (raiz não saneada antes do tratamento), a vegetação ainda não invadiu a área tratada. No entanto observa-se o aparecimento de musgo após as chuvadas, o que indica que o solo permanece permeável o suficiente para suportar a vegetação, e que o tratamento atuou principalmente na superfície, introduzindo alguma resistência e rigidez.

Finalmente, o clima foi monitorizado apenas para verificar a intensidade de precipitação e a possibilidade de formação de ravinas.

7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentaram-se os resultados das campanhas de monitorização realizadas a um talude da autoestrada A13 tratado por biocimentação, que consistiram na recolha de amostras para a determinação da distribuição espacial da percentagem de carbonato de cálcio na área tratada, medição do coeficiente de permeabilidade. As campanhas com recolha de amostras superficiais decorreram cerca de 1 ano, tendo sido interrompidas depois da medição da resistência à penetração com um penetrómetro ligeiro, com recolha de amostras para medição da distribuição de carbonato de cálcio em profundidade, porque este ensaio remexeu o solo da superfície do talude.

Verificou-se bastante heterogeneidade na distribuição do carbonato de cálcio (biocimento) na superfície tratada, explicada pelo método de tratamento ser com rega superficial. Tal explica que as maiores percentagens de carbonato de cálcio tenham sido encontradas na faixa vertical central do talude. Os valores médios das percentagens de carbonato de cálcio têm-se mantido próximos de 4%, que é o valor de dimensionamento. É possível encontrar pequenos agregados com percentagens de

biocimento superiores a 20%, mas não há a formação de nenhuma capa contínua com esta percentagem tão elevada.

Os resultados do ensaio com penetrómetro ligeiro e recolha de amostras em profundidade mostraram algumas diferenças entre os dois métodos de tratamento adotados. Onde só houve rega observou-se biocimento até cerca de 0,30 m de profundidade, resultante da infiltração dos fluidos de tratamento. A percentagem de biocimento foi máxima entre 0,40 e 0,50 m de profundidade na zona regada e injetada, que corresponde à profundidade dos tubos de injeção. Estes máximos estão concordantes com os valores da resistência à penetração, ainda que a camada de areia tratada esteja assente numa formação com mais finos e o penetrómetro tenha atingido essa formação a baixa profundidade.

Independentemente dos métodos de tratamento, a espessura da zona tratada foi pequena, mas o suficiente para aumentar a resistência do solo ao ravinamento. Houve formação de ravinas ainda durante o tratamento, que se concentraram na faixa horizontal inferior do talude por ser a zona de escorrência e não ter sido tratada. O material mais solto foi removido logo após a primeira chuvada, mas era proveniente essencialmente das faixas laterais de acesso ao talude e onde o solo não foi tratado. As ravinas formadas não estão a progredir no tempo, o que mostra que o tratamento foi eficiente contra o ravinamento, tal como o pretendido. Os resultados são animadores porque o talude mantém-se estável após a erosão verificada e espera-se que se mantenha assim. O talude permanecerá em observação pelo menos nos próximos 2 anos para continuar a investigar a durabilidade do tratamento.

Finalmente, este tratamento foi aplicado como caso de estudo para estabilização superficial de taludes. A sua recomendação como alternativa às soluções tradicionais só poderá ser feita após validação, com mais casos de estudo como o que se apresenta. Será possível aplicar este tratamento em taludes com outras geometrias desde que se mantenham as condições de acessibilidade, que são as mesmas que as necessárias para aplicar outros tratamentos que impliquem injeções a baixas pressões. Será também possível aplicar o tratamento a outros tipos de solos desde que haja estudo prévio em laboratório para definir as dosagens e o melhor protocolo para o tratamento.

8 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT I.P pelo financiamento através do projeto de investigação CALCITE, ref. PTDC/ECI-EGC/1086/2021.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al Qabany, A.; Soga, K. (2013). *Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils*. *Geotechnique*, 63, pp. 331–339. <https://doi.org/10.1680/geot.SIP13.P.022>
- ASTM D2487-11 (2011). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. Annual Book of ASTM Standards.
- Bhutange, S. P.; Latkar, M. V. (2020). *Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation in Construction Materials*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32 (5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003141](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003141)
- Borges, I.; Milhomens, N.; Braz de Oliveira, S.; Duarte, S. O.; Monteiro, G.; Cruz, M. Q.; Cardoso, R. (2021). Estudo da biocimentação como técnica de tratamento superficial de taludes para evitar ravinamento. 17º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa.

- Cardoso, R.; Vieira, J.; Borges, I. (2023). *On the use of Biocementation to treat collapsible soils*. Engineering Geology, Volume 313, February 2023, 106971. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106971>
- Cardoso, R.; Oliveira, M.; Cruz, M., Gonzalez, I.; Rodrigues, A. T.; Anjos, B.; Sapin, L.; Esnault-Fillet, A. (2024). *Preliminary results on the biocementation treatment of a Portuguese motorway slope to prevent ravine formation*. Proc. XVIII European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVIII ICSMGE), Lisbon, Portugal.
- Chek, A.; Crowley, R.; Ellis, T. N.; Durnin, M.; Wingender, B. (2021). *Evaluation of Factors Affecting Erodibility Improvement for MICP-Treated Beach Sand*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 147(3): 04021001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002481](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002481)
- Esnault-Fillet, A.; Gutjahr, I.; Garandet, A.; Vigliano, A.; Béguin, R.; Monier, J.-M.; Oxarango, L.; Emeriault, F.; Perthuisot, S.C. (2020). *BOREAL, Bio-reinforcement of embankments by biocalcification*. 4th European Conf. on Unsaturated Soils, Lisbon, Portugal.
- Feng, K.; Montoya, B. M. (2015). *Influence of confinement and cementation level on the behavior of microbial-induced calcite precipitated sands under monotonic drained loading*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 142, 04015057. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001379](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001379)
- Fernandez, R.; Cardoso, R. (2022). *Study on the use of biocementation as slope stabilization technique against erosion*. Transportation Geotechnics, 37, 100873. <https://doi.org/10.1016/j.tgrgeo.2022.100873>
- Gat, D.; Ronen, Z.; Tsesarsky, M. (2017). *Long-term sustainability of microbial-induced CaCO₃ precipitation in aqueous media*. Chemosphere 184, pp. 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.06.015>
- Gomez, M.; Martinez, M.; DeJong, J. T.; Hunt, C.; de Vlaming, L.; Major, D.; Dworatzek, S. (2015). *Field-scale bio-cementation tests to improve sands*. Ground Improvement, Proc of the Institution of Civil Engineers, ICE, 168 (3): 206-216. <https://doi.org/10.1680/grim.13.00052>
- Gowthaman, S.; Nakashima, K.; Kawasaki, S. (2021). *Effect of wetting and drying cycles on the durability of bio-cemented soil of expressway slope*. International Journal of Environmental Science and Technology, 19(4), pp. 2309–2322. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03306-1>
- Lee, M.; Gomez, M.; San Pablo, A. C.; Kolbus, C.; Graddy, C.; Dejong, J.; Nelson, D. (2019). *Investigating Ammonium By-product Removal for Ureolytic Bio-cementation Using Meter-scale Experiments*. Scientific Reports. 9. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54666-1>
- Patil, M.; Dalal, P. H.; Shreedhar, S.; Dave, T. N.; Iyer, K. K. R. (2021). *Biostabilization techniques and applications in Civil Engineering: State-of-the-Art*. Construction and Building Materials, 309, 125098. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125098>
- Pei, R.; Liu, J.; Wang, S.; Yang, M. (2013). *Use of bacterial cell walls to improve the mechanical performance of concrete*. Cement and Concrete Composites, 39, pp. 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.024>
- Phadnis, H. S.; Santamarina, J. C. (2011). *Bacteria in sediments: pore size effects*. Geotechnique Letters 1, pp. 91–93. <https://doi.org/10.1680/geolett.11.00008>
- Pinto, M.; Cardoso, R. (2023). *Development of tools to investigate Biocementation - Microscale Analysis for Studying Bacterial Solutions*. Proc. 8th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, ICEG2023, Porto, Portugal.

- Salifu, E.; MacLachlan, E.; Iyer, K. R.; Knapp, C. W.; Tarantino, A. (2016). *Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation*. Engineering Geology, 201, pp. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.027>
- Shahin, M. A.; Jamieson, K.; Cheng, L. (2020). *Microbial-induced carbonate precipitation for coastal erosion mitigation of sandy slopes*. Geotechnique Letters, 10(2), pp. 211–215. <https://doi.org/10.1680/jgele.19.00093>
- Suer, P.; Hallberg, N.; Carlsson, C.; Bendz, D.; Holm, G. (2009). *Biogrouting compared to jet grouting: Environmental (LCA) and economical assessment*. J. Environmental Science and Health - Part A, 44(4), pp. 346–353. <https://doi.org/10.1080/10934520802659679>
- Tarczewski, R. (2015). *Formation of Sustainable Infrastructure Using Microbial Methods and Humanization of Man-made Environment*. Procedia Manufacturing, 3, pp. 1704-1711. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.07.991>
- Terzis, D.; Laloui, L. (2019). *A decade of progress and turning points in the understanding of bio-improved soils: A review*. Geomechanics for the Energy and the Environment. Volume 19, 100116. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2019.03.001>
- Van Paassen, L.; Ghose, R.; van der Linden, T.; van der Star, W.; Van Loosdrecht, M. (2010). *Quantifying Biomediated Ground Improvement by Ureolysis: Large-scale Biogrout Experiment*. J. Geotech. Geoenviron. Eng., 136, pp. 1721-1728. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000382](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000382)