

REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DO SOLO COM BIOPOLÍMERO PRODUZIDO A PARTIR DE BACTÉRIAS

REDUCING SOIL PERMEABILITY USING BACTERIA-PRODUCED BIOPOLYMER

Mendonça, Amanda, Universidade de Coimbra, Portugal, amaandamendonca@hotmail.com*

Morais, Paula, Universidade de Coimbra, Portugal, pvmorais@ci.uc.pt

Venda Oliveira, Paulo J., Universidade de Coimbra, Portugal, pjvo@dec.uc.pt

Chung, Ana Paula, Universidade de Coimbra, Portugal, apchung@gmail.com

Pires, Ana Cecília, Universidade de Aveiro, Portugal, accp@ua.pt

*autor para correspondência

RESUMO

A construção de estruturas da Engenharia Civil em alguns solos requer a sua estabilização. O cimento Portland como agente estabilizador apresenta preocupações ambientais, portanto, é fundamental encontrar alternativas sustentáveis para a estabilização do solo na construção civil. Por conseguinte, é muito pertinente estudar metodologias alternativas para substituir a utilização do cimento. Portanto, este trabalho analisa a capacidade do biopolímero do tipo goma xantana, produzido pela linhagem *Stenotrophomonas maltophilia* Faro439 (LabXLG), de reduzir a permeabilidade de um solo arenoso. Além disso, a eficácia deste LabXLG é comparada com a utilização de uma goma xantana comercial (XG) e cimento para vários gradientes hidráulicos e tempos de cura. Os resultados mostram que um tratamento com qualquer tipo de XG pode ser utilizado para substituir o cimento a curto prazo (tempo de cura inferior a 14 dias), embora se obtenha um maior nível de eficácia com a utilização do XG comercial, devido ao seu maior nível de pureza. O tratamento do solo com LabXLG cria uma malha de fibras que ligam as partículas do solo, enquanto o XG comercial preenche os vazios com uma pasta homogénea.

Palavras-chave: Biopolímero; Goma xantana estabilizadora de solo; Solo arenoso.

ABSTRACT

The construction of Civil Engineering structures on some soils requires their stabilization. Portland cement as a stabilizing agent presents environmental concerns, so it is critical to find sustainable alternatives for soil stabilization in civil construction. Therefore, it is very pertinent to study more sustainable alternative methodologies to replace the use of cement. Thus, this work analyses the ability of the more sustainable xanthan-like biopolymer, produced by *Stenotrophomonas maltophilia* Faro439 strain (LabXLG), to reduce the permeability of a sandy soil. Additionally, the effectiveness of this LabXLG is compared with the use of a commercial xanthan gum (XG) and cement for various hydraulic gradients and curing times. The results show that a treatment with either type of XG can be used to replace the cement over the short term (curing time less than 14 days), although a greater level of effectiveness is obtained with the use of the commercial XG, due to its higher level of purity. The soil treatment with LabXLG creates a network of fibres that link the soil particles, while the commercial XG fills the voids with a homogeneous paste.

Keywords: biopolymer; soil stabilisation xanthan gum; sandy soil.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento crescente e conseqüente aumento da construção nos principais centros urbanos em todo o mundo resulta numa necessidade de infraestruturas sobre e/ou dentro de formações geotécnicas sem as características mais favoráveis. No passado, estas formações eram frequentemente consideradas inadequadas para a engenharia civil. As principais limitações destes tipos de solos estão geralmente relacionadas com propriedades mecânicas e características de permeabilidade insuficientes que são inadequadas para a maioria das práticas de construção. Algumas técnicas de melhoramento do solo são frequentemente utilizadas para melhorar as propriedades destes solos a fim de ultrapassar estas limitações e permitir a construção segura de infraestruturas. Atualmente, a estabilização química utilizando ligantes à base de cimento é uma das técnicas mais utilizadas (Al e Soga, 2013). Contudo, a aplicação de materiais à base de cimento suscita algumas preocupações do ponto de vista ambiental, em particular: (i) a atividade associada à produção de cimento cria emissões significativas de CO₂; de facto, em 2014, esta atividade contribuiu para cerca de 8-10% das emissões globais de CO₂ (ASTM, 2012; ASTM, 2017; Ayeldeen et al., 2016) (ii) a utilização de materiais à base de cimento para a estabilização do solo cria um material composto irreversível (Ayeldeen et al., 2016); (iii) a utilização de ligantes à base de cimento para a estabilização do solo induz um aumento do pH do solo, com efeitos prejudiciais para a vegetação e comunidades microbianas (Ayeldeen et al., 2017).

A fim de diminuir o *footprint* causado pelos materiais à base de cimento, alguns materiais biológicos alternativos que promovem a melhoria das propriedades do solo têm sido investigados durante os últimos anos. Estes biomateriais podem ser obtidos a partir da atividade de microrganismos e/ou da utilização de substâncias derivadas dos mesmos. Materiais produtores de bactérias (Biju e Arnepalli, 2020) e enzimas (Cabalar et al., 2017) têm sido utilizados para catalisar a hidrólise da ureia em meios porosos para promover a biocementação e os biopolímeros têm sido utilizados para modificar as propriedades dos solos (Ayeldeen et al., 2017; Cabalar et al., 2017). O efeito da biocementação em tais propriedades deve-se geralmente à associação de dois fatores, a criação de algumas ligações no esqueleto sólido e o preenchimento dos espaços vazios entre as partículas do solo com cristais de carbonato de cálcio. Os resultados publicados com esta metodologia nos solos arenosos mostraram que o processo de biocementação promove uma melhoria no comportamento mecânico (Bouazza et al., 2009; Carmona et al., 2018; Chang et al., 2019) e uma diminuição no coeficiente de permeabilidade do solo biocementado (Venda Oliveira e Neves, 2019). Durante os últimos anos, vários estudos têm investigado diferentes biopolímeros para a melhoria do solo, especificamente em termos de (i) melhoria do comportamento mecânico com o uso de goma Guar (Chang et al., 2015), β -glucan (Carmona et al., 2018), e goma xantana (Mendonça et al., 2021); (ii) alteração das características de compressibilidade com o uso de goma Guar, e-polissina catiónica, goma xantana, goma gelana, e goma ágar (Chang et al., 2016); (iii) alteração das propriedades de plasticidade com o uso de goma Guar, e-polilisina catiónica, e goma xantana (Chang et al., 2019; Cabalar et al., 2017, Biju e Arnepalli, 2020); (iv) coeficiente de permeabilidade reduzido com o uso de goma Guar (Ayeldeen et al., 2017) goma quitosana, e goma xantana (Cabalar et al., 2017); (v) uso de goma quitosana para remediar solos contaminados (Ayeldeen et al., 2016); (vi) redução da erosão do solo com o uso de goma xantana e sal de caseína e caseinato de sódio (Chang et al., 2019). A recente pesquisa relativa ao efeito da goma xantana (XG) na condutividade hidráulica das misturas de xantana do solo pode ser resumida da seguinte forma:

(i) A biostabilização de solos arenosos e siltosos com XG induz o preenchimento dos espaços porosos do solo com hidrogéis, que obstruem o fluxo de água (ou seja, entupimento dos poros) e conseqüentemente reduzem o coeficiente de permeabilidade da mistura XG-solo. Este efeito tende a ser mais significativo com um aumento do conteúdo de XG da mistura (Ayeldeen et al., 2017; Bouazza et al., 2009; Carmona et al., 2018). De facto, os resultados experimentais de Ayeldeen et al. (2017) mostram que o tratamento de areia e solos sedosos com um teor de 2% de XG leva a uma redução do coeficiente de permeabilidade para 10% do valor mostrado para os solos não tratados.

(ii) Os resultados da mistura de XG (0,5%-3%) com areia não estão de acordo com o comportamento descrito anteriormente para os solos siltosos e arenosos biostabilizados, uma vez que se observa um ligeiro aumento do coeficiente de permeabilidade com o aumento do teor de XG (Cabalar et al., 2017). Estes resultados realçam o efeito das partículas mais finas (lodo ou argila) no tipo de solo em termos da eficácia do tratamento com biopolímeros.

Embora a utilização de XG na estabilização do solo seja mais sustentável do que a utilização de cimento Portland, a produção industrial de goma xantana comercial não é totalmente ecológica, uma vez que inclui: processos de fermentação, filtração (ou centrifugação), precipitação utilizando não-solventes, a utilização de sais, e ajustes de pH (Chang et al., 2015). A fim de mitigar algumas das preocupações ambientais relacionadas com a utilização de XG comercial, este trabalho estuda a capacidade de uma goma tipo xantana obtida diretamente da estirpe de *Stenotrophomonas maltophilia* Faro439 (LabXLG) para reduzir a permeabilidade do solo tratado. O objetivo do presente trabalho é comparar a eficácia do LabXLG com o XG comercial e a estabilização tradicional com cimento relativamente ao coeficiente de permeabilidade do solo arenoso. Além disso, são analisados o efeito do tempo de cura (3, 7, 14, e 28 dias), o gradiente hidráulico (6,9, 8,2, 9,4, e 10,6), o conteúdo de XG (0,16 e 0,33%), e o cimento (0,33 e 1,0%). A microscopia electrónica de varrimento (SEM) com raio X dispersivo de energia (EDX) foi também utilizada para estudar a microestrutura e a composição química do solo tratado com LabXLG e XG comercial.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Caracterização do Solo

A distribuição granulométrica e as principais características do solo utilizado nas experiências são mostradas no Quadro 1. Trata-se de uma areia siltosa não orgânica e não plástica, composta de 72,7% de areia e 27,3% de lodo, classificada como SM (ASTM D2487, 2017). As características de compactação do solo alcançadas utilizando o teste padrão Proctor (ASTM D698, 2012) mostram um teor óptimo de água (w_{opt}) de 14,3% e um peso máximo seca (γ_{dmax}) de 16,2 kN/m³. O valor do pH do solo não tratado é de aproximadamente 7,1.

2.2. Produção do Composto do Biopolímero à base de Goma Xantana

A produção do composto com biopolímero com as seguintes etapas (Ayeldeen et al., 2016) (i) Estirpe de *Stenotrophomonas maltophilia* Faro439 (UC-CCB 127), obtida da Coleção de Cultura Bacteriana da Universidade de Coimbra foi cultivada em placas de ágar R2A (meio de ágar Reasoner 2A) durante 3 dias, a uma temperatura de 25 °C; (ii) as células cultivadas foram utilizadas para inocular o meio xantano (Cabalar et al., 2017). As células foram cultivadas num sistema descontínuo incubado durante 24 h num agitador a 150 rpm. Estas células foram utilizadas como inóculo num novo sistema descontínuo com meio xantano incubado durante 3 dias num agitador a 150 rpm antes de serem submetidas ao processo de centrifugação para recuperar a

biomassa contendo o composto biopolímero; (iii) a biomassa foi drenada durante 24 h para remover o excesso de água e liofilizada durante 24 h para obter a forma de pó e para facilitar a mistura com o solo.

A utilização deste composto enriquecido com xantano justifica-se pelo seu simples processo de produção. De facto, o composto é obtido sem a utilização de fases de purificação, solventes, ou procedimentos, ou qualquer equipamento que conduza a consequências a partir do ponto ecológico de pH 7,1 vista. Por conseguinte, esta produção de goma xantana em forma de goma pode ser considerada mais sustentável. Classificação do solo, USCS (*) [ASTM D2487] SM amigável ao ambiente do que o XG comercial. A sua disponibilidade a preços razoáveis em (*) Sistema Unificado de Classificação de Solos; (**) Não plástico; relação com outros biopolímeros e a capacidade deste biopolímero para diminuir a permeabilidade do solo são outros aspectos positivos.

Quadro 1 – Características principais do solo utilizado nos experimentos.

Propriedades	Valores
Distribuição granulométrica	
Areia (%)	72.7
Silte (%)	27.3
Argila (%)	0
Densidade específica, G	2.66 g/m ³
Limites de consistência	NP(**)
Teste Proctor [ASTM D698]:	
Peso máximo seco, d_{max}	16.2 kN/m ³
Teor ótimo de água, w_{opt} (%)	14.3
Teor de matéria orgânica, OM (%)	0.19
pH	7.1

2.3. Goma xantana comercial

O XG comercial utilizado neste trabalho está disponível em pó e é produzido pela bactéria *Xanthomonas campestris* através da fermentação da glicose/sacarose. É um heteropolissacarídeo composto por unidades de glucose, manose e ácido glucurónico. Trata-se de um colóide hidrofílico não tóxico com propriedades reológicas pseudoplásticas (Chang et al., 2019), é estável dentro de uma vasta gama de temperaturas (10°C-80°C) e valores de pH (1-13).

2.4 Cimento Portland

Algumas misturas nesta investigação (Quadro 2) foram quimicamente estabilizadas com cimento Portland tipo I 42,5 R, que é composto por 45% de partículas de cimento com menos de 45mm. O cimento é composto principalmente por óxido de cálcio (CaO = 63,0%), o que induz uma reação espontânea com a água, ou seja, propriedades hidráulicas.

2.5 Procedimento de ensaio

As amostras utilizadas nos testes de permeabilidade foram produzidas em seis tipos diferentes: solo natural, uma mistura de solo com o biopolímero xantano produzido por bactérias (Lab XG) (0,33%), uma mistura de solo com o biopolímero comercial goma xantana para os teores de 0,33% e 0,16%, e também uma mistura de solo com cimento para os teores de 0,33% e 1,0%. Cada tipo de mistura foi testado para diferentes gradientes hidráulicos (6,9, 8,2, 9,4 e 10,6) e após quatro tempos de cura diferentes (3, 7, 14 e 28 dias). Os detalhes do programa de testes são mostrados no

Quadro 2. Embora todas as amostras tenham sido igualmente preparadas, os testes de permeabilidade foram repetidos três vezes para cada condição testada a fim de assegurar a qualidade e a reprodutibilidade dos resultados obtidos.

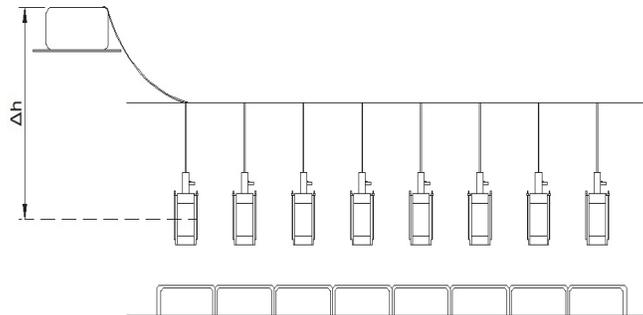


Figura 1 – Esquema do equipamento utilizado para testes de permeabilidade.

Quadro 2 – Programa de testes realizados.

Materiais adicionados			Gradiente hidráulico (m/m)	Tempo de cura (dias)
Lab XG (%)	Comercial XG (%)	Cimento (%)		
0(*)	0(*)	0(*)	6.9	--
			8.2	
			9.4	
			10.6	
--	0.16	--	6.9	3 / 7 / 14 / 28
			8.2	
			9.4	
			10.6	
--	0.33	--	6.9	3 / 7 / 14 / 28
			8.2	
			9.4	
			10.6	
0.33	--	--	6.9	3 / 7 / 14 / 28
			8.2	
			9.4	
			10.6	
--	--	0.33	6.9	3 / 7 / 14 / 28
			8.2	
			9.4	
			10.6	
--	--	1.0	6.9	3 / 7 / 14 / 28
			8.2	
			9.4	
			10.6	

(*) Testes de referência (solo não-estabilizado).

As amostras de solo estabilizado utilizados nos testes de permeabilidade foram preparados de acordo com as seguintes etapas (i) as partículas maiores do solo foram removidas com uma peneira de 2,0 mm; (ii) o solo foi seco em estufa a 105 °C durante 24 horas; (iii) o solo seco e o teor de calda de injeção em pó (apresentado no quadro 2) foram misturados; (iv) o solo, o agente de injeção (LAB XG, XG comercial e cimento) e o teor de água de 14.3% (teor óptimo de água para o teste padrão Proctor) foram misturados até obter uma pasta homogênea; (v) a pasta foi colocada dentro de moldes de PVC (38 mm de diâmetro e 76 mm de altura) em 3 camadas; (vi) cada camada foi compactada de modo a obter o peso da unidade seca de 16.2 kN/m³ (condições ótimas para o teste padrão Proctor); (vii) as superfícies de contacto entre duas camadas sucessivas foram escarificadas antes da introdução de uma nova camada; (viii) os provetes foram armazenados durante o tempo de cura (Tabela 2)

numa câmara húmida com controlo de temperatura ($20\pm 2^{\circ}\text{C}$) e umidade ($95\pm 5\%$); (viii) após o tempo de cura, os provetes foram montados no equipamento utilizado para realizar os testes de permeabilidade (Figura 1); (ix) um recipiente foi colocado para medir o volume da água que passava através da amostra; (x) o nível da água foi ajustado de modo a assegurar os gradientes hidráulicos indicados no Quadro 2; (xi) os testes de permeabilidade foram realizados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes de permeabilidade obtidos experimentalmente com as diferentes misturas e gradientes hidráulicos são apresentados nas Figuras 2a, 2b, 2c e 2d para um tempo de cura de 3, 7, 14 e 28 dias, respectivamente. Os resultados do solo natural são utilizados como valores de referência para avaliar o impacto de cada tipo de material no coeficiente de permeabilidade do solo tratado. Além disso, a inclusão das amostras quimicamente estabilizadas com cimento neste trabalho destina-se a comparar a eficácia dos dois XG (comercial e o produzido a partir de bactérias) para reduzir a permeabilidade do solo, com o agente de rejunte (cimento) mais habitual na engenharia geotécnica.

Para uma melhor análise dos resultados, são apresentados o valor médio, os erros máximo e mínimo para cada condição testada. Como esperado, e como é habitual neste tipo de mistura (Chang et al., 2015) há uma grande dispersão dos resultados, que é mais significativa para o solo natural e para o solo tratado com Lab XG. De facto, estes resultados refletem alguma heterogeneidade do solo natural, o baixo nível de pureza do Lab XG e a dificuldade em produzir provetes homogéneos quando se utiliza um baixo teor de XG. De facto, um aumento do conteúdo do XG comercial de 0,16% para 0,33% diminui significativamente a dispersão dos resultados.

3.1 Efeito do tipo e conteúdo do material estabilizante

Independentemente do tempo de cura e do gradiente hidráulico, os resultados representados na figura 2 mostram claramente que a estabilização do solo com ambos os tipos de XG induz uma diminuição significativa do coeficiente de permeabilidade. Este comportamento deve-se ao desenvolvimento de algumas ligações e hidrogéis viscosos devido ao contacto do XG com a água (ou seja, hidratação dos hidrogéis) que enchem parte dos vazios do solo (Chang et al., 2016; Correia et al., 2015), induzindo uma diminuição da permeabilidade do solo. Os resultados revelam também que o XG comercial é mais eficaz do que o XG Lab para reduzir a permeabilidade do solo; de facto, a utilização de 0,33% do XG Lab nas misturas tem muito menos efeito do que a utilização de 0,33% do XG comercial e mesmo com a utilização de 0,16% do XG comercial, principalmente para tempos de cura mais elevados. Esta maior eficácia do XG comercial é consistente com a sua maior pureza quando comparado com o XG Lab. De facto, é importante afirmar que o XG Lab utilizado nos testes é composto pela biomassa liofilizada formada por *Stenotrophomonas*, contendo o biopolímero e células liofilizadas responsáveis pela sua produção, pelo que se obtém um baixo nível de pureza.

A comparação da utilização de XG com a utilização de cimento Portland (o ligante mais habitual para a estabilização do solo) mostra que a utilização de 0,33% de XG comercial é mais eficaz do que a utilização de 1% de cimento, nomeadamente para um tempo de cura de 7 e 14 dias. Mesmo para um tempo de cura de 28 dias, a eficácia de 0,33% do XG comercial é semelhante à utilização de 0,33% de cimento. Assim, estes resultados indicam que o XG comercial pode ser utilizado para substituir a utilização do cimento, principalmente a curto prazo (por exemplo, em trabalhos temporários).

Como o processo de produção do XG comercial está associado a um processo industrial dispendioso e complexo com algumas preocupações ambientais (como discutido na secção 1), e tendo em consideração os impactos ambientais, os custos de produção e a eficiência em conjunto, a utilização do XG comercial surge como uma alternativa viável para reduzir a permeabilidade de um solo.

É de salientar que os resultados favoráveis obtidos com o Lab XG produzido sob a forma de pó provaram que é possível utilizar este biopolímero sustentável. De facto, a sua produção é menos dispendiosa, menos nociva para o ambiente e garante que mesmo com uma baixa percentagem é capaz de alcançar uma redução considerável no coeficiente de permeabilidade do solo tratado.

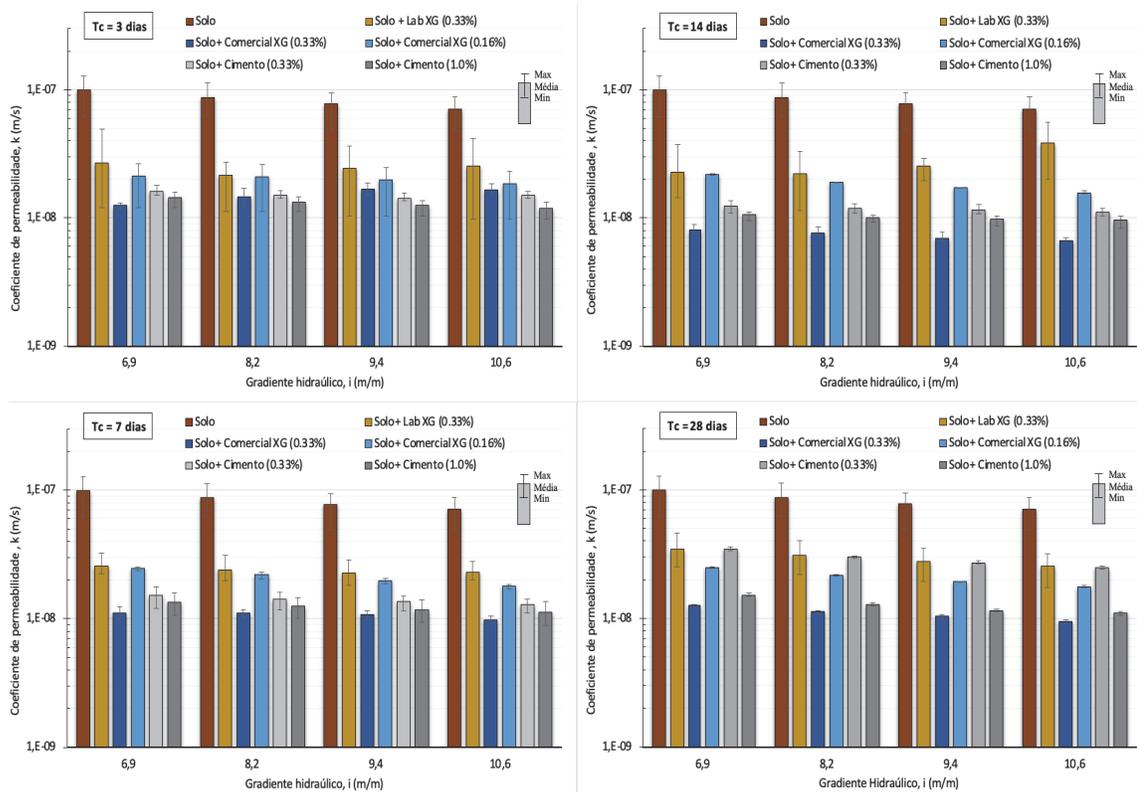


Figura 2 – Coeficiente de permeabilidade do solo natural e do solo estabilizado para diferentes gradientes hidráulicos; a) tempo de cura de 3 dias; b) tempo de cura de 7 dias; c) tempo de cura de 14 dias; d) tempo de cura de 28 dias.

3.2 Efeito do gradiente hidráulico

Com algumas exceções (por exemplo, a mistura do solo com o Lab XG durante um tempo de cura de 14 dias), a maioria dos resultados mostram uma ligeira diminuição do coeficiente de permeabilidade com o aumento do gradiente hidráulico, principalmente para o solo natural e o solo tratado com 0,16% do XG comercial. Embora esta tendência não esteja de acordo com a maioria dos resultados obtidos por Cabalar et al (2017) para uma gama de gradiente hidráulico de 5 a 100, em alguns casos o aumento do gradiente hidráulico de 5 e 10 (semelhante à gama considerada neste trabalho) mostra também uma diminuição da permeabilidade do solo.

As diferenças anteriormente observadas devem-se à metodologia utilizada nos testes para avaliar o coeficiente de permeabilidade. Como mostra a Figura 1 neste trabalho, o coeficiente de permeabilidade foi medido com um fluxo de água descendente.

Assim, o aumento do gradiente hidráulico tende a aumentar a tensão vertical efetiva com a consequente diminuição do rácio de vazios do solo, o que tende a diminuir a permeabilidade do solo, tal como observado na maioria dos resultados deste trabalho. No caso dos provetes tratados com o Lab e o XG comercial, os resultados também parecem indicar que pode haver um movimento de alguns hidrogéis hidratados em direção aos vazios no solo, o que tende a restringir o fluxo de água, induzindo assim as diminuições do coeficiente de permeabilidade.

Os resultados mostram também que os exemplares com um alto nível de estabilização (ou seja, com um baixo coeficiente de permeabilidade) mostram um impacto menor na variação do gradiente hidráulico. De facto, o esqueleto sólido mais forte promovido pela estabilização com um elevado teor do XG comercial (0,33%) e do cimento (0,33% e 1%), restringe o eventual movimento das partículas do solo e dos hidrogéis, o que leva a uma menor influência do gradiente hidráulico.

3.3 Efeito do tempo de cura

Independentemente do processo de produção da XG, observa-se uma forte diminuição da permeabilidade do solo nos primeiros 3 dias de cura, seguida de uma ligeira diminuição ao longo do tempo até um coeficiente de permeabilidade mínimo para um tempo de cura de 14 dias. Embora estes resultados indiquem que a hidratação dos hidrogéis tende a ocorrer fundamentalmente a curto prazo (< 3 dias), sugerem também que ainda existe alguma hidratação dos hidrogéis durante os primeiros 14 dias de tempo de cura. De facto, como a hidratação começa do exterior dos hidrogéis, isto parece impedir que a água penetre na parte interior dos hidrogéis, o que leva a uma hidratação lenta e gradual desta zona interior. Após 14 dias de cura, observa-se um ligeiro aumento da permeabilidade do solo com a utilização de ambos os tipos de XG, sugerindo alguma biodegradação do XG (Mendonça et al., 2021) e/ou a desidratação dos hidrogéis com o consequente encolhimento do XG. Estes dois factores aumentam os espaços porosos no solo ao longo do tempo, o que favorece o fluxo de água e, consequentemente, observa-se um aumento da permeabilidade do solo.

A diminuição da permeabilidade do solo a curto prazo (menos de 14 dias) está de acordo com os resultados de Chang et al. (2019) para uma gama semelhante de tempos de cura, enquanto o aumento do coeficiente de permeabilidade a longo prazo (mais de 14 dias) coincide com os resultados de Ayelden et al. (2017) e Cabalar et al. (2017).

Como esperado, os espécimes quimicamente estabilizados com cimento, mostram uma redução do coeficiente de permeabilidade com o tempo de cura, que é consistente com o desenvolvimento das reacções pozolânicas que ocorrem a longo prazo. Assim, durante um tempo de cura de 28 dias, o coeficiente de permeabilidade do solo tratado com cimento e o XG comercial com o mesmo conteúdo (0,33%) mostram uma eficácia semelhante, enquanto a curto prazo o XG comercial induz uma maior redução da permeabilidade do solo.

3.4 Análise das estruturas formadas na mistura biopolímero-solo

A figura 3 mostra as imagens SEM da estrutura do esqueleto sólido do solo tratado com ambos os tipos de XG. A utilização do Lab XG parece induzir a criação de estruturas semelhantes a uma rede de fibras que ligam as partículas do solo, o que diminui os vazios no solo, reduzindo assim a sua permeabilidade. Chang et al (2019) observaram também que o XG cria pontes entre as partículas do solo. No entanto, a utilização do XG comercial parece produzir uma pasta homogénea, provavelmente devido à hidratação dos hidrogéis, responsável pela redução do coeficiente de

permeabilidade. As diferenças nas estruturas do esqueleto sólido induzidas por ambos os tipos de XG parecem estar relacionadas com as diferenças na eficácia dos dois tipos de XG para reduzir a permeabilidade do solo. De facto, a estrutura mais aberta promovida pelo Lab XG está associada a uma maior permeabilidade do solo, enquanto a pasta homogénea induzida pelo uso do XG comercial limita o fluxo de água.



Figura 3 - À esquerda: imagem SEM da mistura Lab XG + soil. À direita: imagem SEM da mistura XG Comercial + soil.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho compara a capacidade da goma xantana obtida directamente de uma estirpe da espécie *S. maltophilia* Faro439 (LabXLG), com a goma xantana comercial (XG) e o cimento Portland para diminuir o coeficiente de permeabilidade de um solo arenoso. A partir do programa de testes experimentais, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- (i) O tratamento do solo com ambos os tipos de XG induz uma diminuição significativa do coeficiente de permeabilidade em comparação com o solo não tratado.
 - (ii) A comparação dos dois tipos de XG mostra que o LabXLG é menos eficaz do que o XG comercial, que está relacionado com o seu menor nível de pureza. A biomassa liofilizada formada por *S. maltophilia* Faro439 também contém células liofilizadas, bem como o biopolímero.
 - (iii) A utilização de um teor de 0,33% de XG comercial é mais eficaz para reduzir o coeficiente de permeabilidade do solo tratado do que a utilização de 1% de cimento, nomeadamente para um tempo de cura de 7 e 14 dias. Estes resultados indicam que o XG pode substituir a utilização do cimento a curto prazo, por exemplo, em trabalhos temporários.
 - (iv) O aumento do gradiente hidráulico induz uma ligeira diminuição do coeficiente de permeabilidade. Isto é consistente com o fluxo descendente de água utilizado nos testes de permeabilidade, uma vez que o aumento do gradiente hidráulico tende a aumentar a tensão vertical efectiva com a consequente diminuição da taxa de vazios e da permeabilidade do solo.
 - (v) A microestrutura do solo tratado depende do tipo de XG, que está ligada à eficácia de cada um para reduzir a permeabilidade do solo. Assim, o LabXLG cria uma rede de fibras que liga as partículas do solo e diminui os vazios no solo, enquanto o XG comercial induz o preenchimento parcial dos espaços porosos com uma pasta homogénea, provavelmente devido à hidratação dos hidrogéis.
- Finalmente, deve ser mencionado que tomando o processo de produção e a sua eficácia ao reduzir o coeficiente de permeabilidade em consideração, os resultados

experimentais deste trabalho mostram que a goma xantana produzida utilizando a estirpe *S. maltophilia* Faro439 surge como uma alternativa interessante para a utilização na estabilização de solos arenosos.

Embora a *Stenotrophomonas maltophilia* esteja incluída no grupo patogénico facultativo BSL-2, não existem regulamentos disponíveis para a libertação deste tipo de microrganismo no ambiente, e o número de células detetadas nos ensaios com o solo é muito baixo. Por conseguinte, são ainda necessários estudos futuros para garantir que este material é totalmente seguro.

REFERÊNCIAS

Al Qabany, A., e Soga, K. (2013). Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils. *Géotechnique*, pp. 331–339.

ASTM (2012) D698-12e2, “Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12.400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)”. D698-12e2, *American Society for Testing and Materials*, USA.

ASTM (2017). “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)”. D2487-17e1, *American Society for Testing and Materials*, USA.

Ayeldeen, K.M., Abdelazim, M.N., Mostafa, A.E.S. (2016). Evaluating the physical characteristics of biopolymer/soil mixtures. *Arab. J. Geosci.*, vol. 9, pp. 371.

Ayeldeen, M., Negm, A.; El-Sawwaf, M.; Kitazume, M. (2017). Enhancing mechanical behaviors of collapsible soil using two biopolymers. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, pp. 329–339.

Biju, M.S. Arnepalli, D.N. (2020). Effect of biopolymers on permeability of sand-bentonite mixtures. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.*, vol. 12, pp. 1093–1102.

Bouazza, A., Gates, W.P., Ranjith, P. G. (2009). Hydraulic conductivity of biopolymer-treated silty sand. *Géotechnique*. vol. 59, pp. 71–72

Cabalar, A. F., Wiszniewski, M., Skutnik, Z. (2017). Effects of Xanthan Gum Biopolymer on the Permeability, Odometer, Unconfined Compressive and Triaxial Shear Behavior of a Sand. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, vol. 54, pp. 356–361.

Carmona, J.P.S.F., Venda Oliveira, P.J., Lemos, L.J.L., Pedro, A.M.G. (2018). Improvement of a sandy soil by enzymatic CaCO₃ precipitation. *ICE – Geotechnical Engineering*, vol. 171, pp. 3-15.

Chang I., Kwon Y-M. , Im J., Gye-Chun Cho G-C. (2019). Soil consistency and interparticle characteristics of Xanthan gum biopolymer-containing soils with pore-fluid variation. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 56, pp. 1206–1213.

Chang, I., Im, J., Cho, G. C. (2016). Introduction of microbial biopolymers in soil treatment for future environmentally friendly and sustainable geotechnical engineering. *Sustainability*, vol. 8, pp. 22-34.

Chang, I., Jeon M., Cho, G.C. (2015c). Application of microbial biopolymers as an alternative construction binder for earth buildings in underdeveloped countries. *International Journal of Polymer Science*. vol.12, pp. 12-23.

Correia, A.A.S., Casaleiro, P.D.F. e Rasteiro, M.G. (2015). Applying multiwall carbon nanotubes for soil stabilization. *Procedia Engineering - Special Issue: New Paradigm of Particle Science and Technology Proceedings of the 7th World Congress on Particle Technology*, vol. 102, pp. 1766–1775.

Mendonça, A., Morais, P.V., Pires, A.C., Chung, A.P., Oliveira, P.V. (2021). A Review on the Importance of Microbial Biopolymers Such as Xanthan Gum to Improve Soil Properties. *Appl. Sci.* vol. 11, pp.170-186.

Venda Oliveira, P.J., Neves, J.P.G. (2019). Effect of Organic Matter Content on Enzymatic Biocementation Process Applied to Coarse-Grained Soils. *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 3.