

## Estudo Preliminar de Biocimentação em Solo Colapsível com *Bacillus subtilis*

Maria Gabriela Assunção Machado

Engenheira Civil, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, [mariagabriela\\_mga@hotmail.com](mailto:mariagabriela_mga@hotmail.com)

Nicole Schwantes Cezario

Docente, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, [nicoleschwantes@uel.br](mailto:nicoleschwantes@uel.br)

Raquel Souza Teixeira

Docente, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, [raquel@uel.br](mailto:raquel@uel.br)

Renan Felipe Braga Zanin

Docente, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, [renanzanin@uel.br](mailto:renanzanin@uel.br)

Alana Dias de Oliveira

Docente, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Brasil, [alanaoliveira@utfpr.edu.br](mailto:alanaoliveira@utfpr.edu.br)

**RESUMO:** Solos colapsíveis sofrem redução abrupta de volume com o aumento da umidade, gerando recalques e danos em fundações e estruturas. Este comportamento desafia a engenharia geotécnica, especialmente em regiões com solos argilosos residuais e lateríticos, como Londrina/PR. A biocimentação, amplamente estudada em materiais cimentícios, é uma técnica biotecnológica e sustentável baseada na precipitação de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) induzida por bactérias, visando aumentar a resistência e reduzir a permeabilidade. Este trabalho avalia, de forma preliminar, o uso de *Bacillus subtilis* na estabilização de solo argiloso colapsível, verificando sua capacidade de induzir a formação de  $\text{CaCO}_3$  e reduzir o índice de colapso. Corpos de prova foram moldados com amostras indeformadas, percolados com solução bacteriana e curados por três dias, sendo submetidos a ensaios edométricos com inundação sob tensões de 25, 50 e 100 kPa. Os índices de colapso tratados foram 3,74%, 7,83% e 5,87%, enquanto os de referência foram 1,79%, 6,86% e 4,45%, respectivamente. Apesar de não reduzir o colapso, análises de MEV evidenciaram bioatividade, enquanto DRX não detectou cristais de  $\text{CaCO}_3$ , indicando possível limitação pela baixa disponibilidade de cálcio ou pelo curto tempo de cura. Conclui-se que a técnica apresenta potencial, mas requer ajustes para aplicação eficiente em solos argilosos colapsíveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilização de solos, Colapso de solos, Precipitação microbiológica, Biocimentação

**ABSTRACT:** Collapsible soils undergo an abrupt reduction in volume when subjected to increased moisture, leading to settlements and damage to foundations and structures. This behavior poses challenges to geotechnical engineering, particularly in regions with residual and lateritic clayey soils, such as Londrina, Brazil. Biocementation, widely studied in cementitious materials, is a sustainable biotechnological technique based on the precipitation of calcium carbonate ( $\text{CaCO}_3$ ) induced by bacteria, aiming to increase soil strength and reduce permeability. This study preliminarily evaluates the use of *Bacillus subtilis* for the stabilization of collapsible clayey soil, assessing its ability to induce  $\text{CaCO}_3$  formation and reduce the collapse index. Undisturbed samples were molded into test specimens, percolated with a bacterial solution, and cured for three days before being subjected to oedometer tests with flooding under vertical stresses of 25, 50, and 100 kPa. The collapse indices for the samples treated were 3.74%, 7.83%, and 5.87%, while the reference samples presented values of 1.79%, 6.86%, and 4.45%, respectively. Although no reduction in collapse was observed, SEM analyses confirmed bioactivity, while XRD did not detect  $\text{CaCO}_3$  crystals, possibly due to low calcium availability in the soil or the short curing period. It is concluded that the technique shows potential but requires adjustments for effective application in collapsible clayey soils.

**KEYWORDS:** Soil stabilization, Soil collapse, Microbiological precipitation, Biocementation.

## 1 INTRODUÇÃO

A Geotecnia é um ramo essencial da Engenharia Civil que estuda o comportamento dos solos em obras de infraestrutura, especialmente fundações e estruturas de terra, com foco na segurança, durabilidade e funcionalidade das construções (Alonso, 2019). Entre os principais desafios, destacam-se os solos colapsíveis, que sofrem redução abrupta de volume ao entrarem em contato com a umidade, causando rearranjos estruturais e diminuição do índice de vazios (Sisakht et al., 2015). Comuns em regiões com solos argilosos residuais, como o município de Londrina/PR, esses materiais podem ocasionar recalques diferenciais, fissuras e afundamentos, agravados por infiltrações pluviais ou rompimentos de tubulações (Teixeira, 1993).

Entre as técnicas tradicionais de tratamento desses solos estão o pré-umedecimento e o adensamento induzido. No entanto, abordagens mais sustentáveis vêm sendo exploradas, como a Precipitação de Calcita Induzida Microbiologicamente (*Microbiologically Induced Calcite Precipitation* – MICP), que utiliza a atividade metabólica de bactérias para precipitação de carbonato de cálcio (Mortensen, 2011; Canakci et al., 2015; Calai, 2021; Teles e Florentino, 2022). Essa técnica tem mostrado bons resultados em solos arenosos, promovendo o aumento da resistência ao cisalhamento e à compressão, com desempenho semelhante ao de solos tratados com aglomerantes tradicionais (Dejong et al., 2006). O uso de soluções biotecnológicas, como a biocimentação, tem sido visto como promissor por combinar desempenho técnico e menor impacto ambiental, reduzindo o uso de materiais cimentícios convencionais (Stefaniak et al., 2023).

Entretanto, a aplicação da MICP em solos de grãos finos ainda apresenta limitações. As partículas finas dificultam a penetração da bactéria e da solução percoladora, prejudicando a formação e a distribuição homogênea da calcita (Dejong et al., 2006). Além disso, a eficiência do processo depende de diversos parâmetros como o pH do meio, a fonte de cálcio utilizada, a concentração celular e o tempo de cura (Qabany et al., 2012), tornando seu desempenho ainda bastante variável em solos argilosos.

Este trabalho investiga, de forma preliminar, o potencial de aplicação da bactéria *Bacillus subtilis* na biocimentação de um solo argiloso colapsível oriundo da região do município de Londrina – PR. Trata-se de um solo residual de basalto com características lateríticas, onde a presença de óxidos de ferro e alumínio induz a microagregação das partículas, conferindo uma permeabilidade de campo muitas vezes superior à esperada para sua classificação granulométrica (Oliveira et al., 2024). Tal particularidade oferece um cenário desafiador e promissor para a aplicação da biocimentação, contribuindo para o avanço das técnicas sustentáveis de estabilização de solos finos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia foi estruturada em quatro etapas: (i) coleta de dados físico-químicos do solo para identificar parâmetros relevantes e presença de cálcio; (ii) preparo da solução bacteriana visando promover a atividade do *Bacillus subtilis*; (iii) percolação das amostras para simular a aplicação em campo; e (iv) ensaios edométricos com inundação, acompanhados por análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raios X (DRX) para verificar a ocorrência de biocimentação e avaliar seu efeito sobre o colapso do solo.

### 2.1 Caracterização do Solo de Estudo

Segundo Cavalcante et al. (2007), a geologia da região de Londrina é marcada pela presença de extensas camadas de basalto da Formação Serra Geral, situada na porção central da Bacia Sedimentar do Paraná. O solo que recobre essa formação rochosa tem origem residual, sendo resultante do intemperismo do basalto. A Figura 1 apresenta a localização geográfica da região metropolitana de Londrina, área de estudo deste trabalho.

As amostras indeformadas foram coletadas até 1 metro de profundidade no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina. O material foi utilizado para a confecção dos corpos de prova, moldados de acordo com as dimensões dos anéis de adensamento, com 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. O solo é classificado como silte de alta compressibilidade (MH) pelo SUCS, apresentando comportamento típico de solo argiloso laterítico (LG'), resultante do intemperismo de basaltos da Formação Serra Geral, sendo identificado granulometricamente como argila siltosa com defloculante e silte arenoso sem defloculante (Gonçalves et al., 2018).

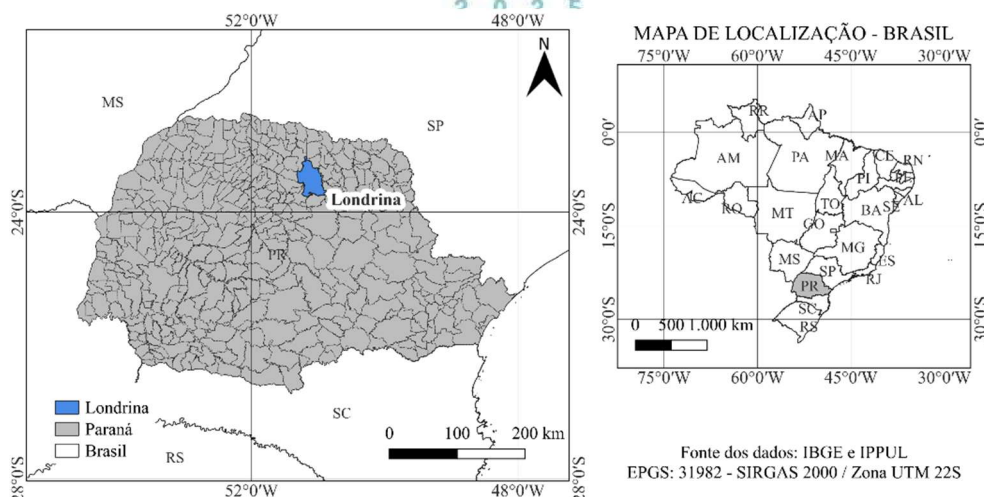


Figura 1. Localização geográfica do município de Londrina

A tensão de pré-adensamento virtual do solo foi estimada em aproximadamente 80 kPa, na condição não inundada, utilizando o método de Pacheco e Silva (Zanin et al., 2021). A caracterização físico-química do solo é apresentada na Tabela 1, onde se destaca a presença de cálcio — elemento fundamental para a precipitação de calcita induzida pela bactéria *Bacillus subtilis* (Gonçalves et al., 2018).

Tabela 1 - Caracterização Físico-Química e Mineralógica do solo de Londrina.

Amostra	Caracterização Física				pH	Caracterização Química						C	MO
	ps (g.cm-3)	LL (%)	LP (%)	IP (%)		Al	H+Al	Ca	Mg	K	CTC		
Londrina	3,03	51	38	13	4,7	0,08	4,96	1,07	0,41	0,16	6,6	3,23	5,56

Nota: ps = Massa específica dos sólidos; LL = Limite de liquidez; LP = Limite de plasticidade; IP = Índice de plasticidade; C = Carbono; MO = Matéria orgânica. Fonte: Gonçalves et al. (2018) adaptada pela autora.

## 2.2 Solução Bacteriana

O meio de cultivo utilizado foi descrito por Sun et al. (2020) com as modificações necessárias. Dessa forma, para a formulação do meio foram utilizados: 20 g/L de Extrato de Levedura, 5 g/L de Peptona de Caseína, 5 g/L de Peptona de Carne, 4 g/L de Sulfato de Amônio (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 8 g/L de Cloreto de Sódio (NaCl). Os componentes foram acondicionados em frascos próprios para esterilização e o meio foi autoclavado a 121°C por 15 min. Vale ressaltar que a referência utiliza um solo com a presença de calcita (CaCO<sub>3</sub>), dolomita [CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>], cloreto de sódio (NaCl), sulfato de magnésio (MgSO<sub>4</sub>) e sulfato de cálcio (CaSO<sub>4</sub>), para que a bactéria pudesse cumprir com a sua função e consumir da fonte de cálcio fornecida pelo meio em que se encontra. Por isto, para esse estudo, a mesma decisão foi tomada, visto que o material possui Ca naturalmente, sendo a fonte da bactéria para produção de CaCO<sub>3</sub>.

Foram realizados dois tipos de solução: uma apenas com o meio de cultura controle, a fim de realizar os experimentos nos corpos de prova de referência, e um com a adição do inóculo *Bacillus subtilis* da cepa CV16, à uma concentração de 107 esporos/mL, conforme Qabany et al. (2012), Sharma e Ramkrishnan (2016) e Hasriana et al. (2018). Em seguida, a solução foi aplicada nos corpos de prova por infiltração gravitacional, uma maneira simples de ser executada em campo, onde ela penetra na amostra do topo para a base através da gravidade, mantendo a amostra em repouso.

## 2.3 Sistema de Percolação

Em seguida, foi montado o sistema de percolação, composto pelo corpo de prova talhado, papel filtro, pedra porosa, filtro de metal e cilindro de PVC, conforme mostra a Figura 2.

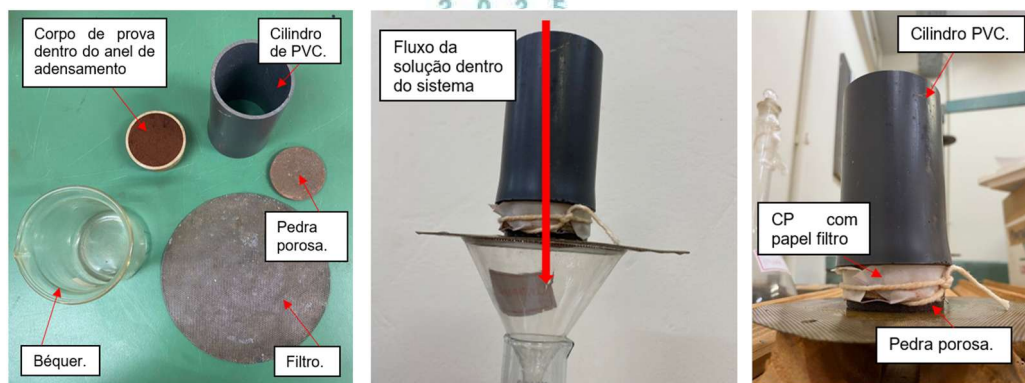


Figura 2. Sistema de percolação

Para que fosse possível replicar as condições naturais do solo, com os vazios preenchidos por água, e uma melhor transferência de pressão sobre o solo, a pedra porosa foi saturada com a solução controle. Por conta da heterogeneidade do solo, da diferença de umidade dos dias em que os corpos de prova foram moldados e dos índices de vazios, cada um deles teve um tempo limite. Ao encontrar este tempo em que o CP levou para passar todo o líquido, foi feita a análise a cada 24h, saturando o corpo de prova por completo novamente, a fim de atingir uma quantidade passante de 0 ml, sinalizando que, em teoria, todos os vazios estariam preenchidos com a solução biocimentante (CV16), conforme ilustrado na Tabela 2.

Tabela 2. Ciclo de Percolação dos Corpos de Prova.

CP	CV16	Ciclo	Horas	Dias	Volume passante (ml)	Tempo (min)
2	Sim	1	0	0	29	14
	Sim	2	24	1	19	14
	Sim	3	48	2	0	14
3	Sim	1	0	0	30	9,5
	Sim	2	24	1	23	9,5
	Sim	3	48	2	0	9,5
4	Sim	1	0	0	30	25
	Sim	2	24	1	24	25
	Sim	3	48	2	0	25

Após completarem 3 ciclos de percolação, os corpos de prova passaram pelo processo de cura de 48h, antes de serem levados para a prensa de adensamento. Para isso, foi feita a armazenagem em um recipiente de isopor a fim de protegê-los contra a perda de umidade.

## 2.4 Ensaio Edométrico

Foi utilizada uma prensa devidamente equipada com a célula de adensamento (edômetro), e o procedimento experimental foi realizado de acordo com a NBR 16853 (ABNT, 2020). No sistema de cargas foram aplicadas tensões totais sobre o solo de aproximadamente 6,25, 12,5, 25, 50 e 100 kPa, mantendo-se cada pressão pelo período de 8s, 15s, 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h e 2h contados a partir do instante de aplicação do incremento de carga.

Para se analisar o colapso do solo, o corpo de prova foi inundado imediatamente após atingir a pressão total desejada (25, 50 e 100 kPa), totalizando assim 3 corpos de prova. O índice de colapso ( $I_c$ ) foi calculado a partir dos resultados dos ensaios edométricos com inundação, utilizando a variação percentual de deformação sob tensão constante antes e após a saturação, conforme método proposto por Jennings e Knight (1957).

Após a realização dos ensaios edométricos, amostras representativas dos corpos de prova foram submetidas a análises de MEV e DRX.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Parâmetros Físicos

A primeira etapa foi definir os parâmetros físicos para cada corpo de prova, como demonstrado na Tabela 3, para que pudesse ser realizada uma comparação com os parâmetros físicos do solo sem a presença da bactéria da cepa CV16, conforme estudado por Zanin et al. (2021).

Notou-se um aumento do índice de vazios nos corpos de prova ensaiados à 25kPa e 100kPa, o que justificará mais à frente o aumento também do índice de colapso. Em contrapartida, para o corpo de prova ensaiado à tensão de 50kPa não ocorreu o mesmo comportamento, possivelmente por alguma falha na moldagem do anel, além da bactéria ter se desenvolvido menos em comparação aos outros, fato que poderá ser percebido pelas análises de MEV, no item 3.2.1, através da Figura 4. Este corpo de prova também foge do comportamento padrão ao analisar o grau de saturação antes do ensaio pois, enquanto os outros reduziram este parâmetro ao ter a bactéria adicionada, ele aumentou.

Observa-se que, para o CP inundado em 25 kPa, o teor de umidade e o grau de saturação antes do ensaio foram bem menores em comparação com a referência de Zanin et al. (2021), o que também justificará o maior colapso, visto que, quanto mais seco o solo, maior a energia liberada quando é inundado e, por consequência, maior o colapso.

Tabela 3. Parâmetros físicos do solo de Londrina com e sem influência da CV16.

Unidade	Parâmetro		25kPa		50kPa		100kPa	
			Sem CV16*	Com CV16	Sem CV16*	Com CV16	Sem CV16*	Com CV16
cm <sup>3</sup>	Volume do CP	-	200	40	200	40	200	40
%	Teor de umidade	Antes	35,89	30,96	31,00	31,06	31,40	31,36
		Depois	37,17	50,13	37,07	45,50	38,60	47,12
g	Massa do CP	Antes	222,40	48,17	202,20	53,11	212,10	50,69
		Depois	225,55	59,39	210,88	59,00	220,28	57,73
g/cm <sup>3</sup>	Massa esp. Seca	Antes	1,02	0,94	0,96	1,03	1,00	0,98
		Depois	1,33	1,08	1,34	1,17	1,46	1,14
-	Índice de vazios	Antes	1,95	2,23	2,13	1,93	1,99	2,08
		Depois	1,24	2,02	1,23	1,89	1,02	1,94
%	Grau de saturação	Antes	55,27	42,00	43,75	48,64	47,34	45,64
		Depois	90,17	75,22	90,10	72,90	100,00	73,45

Fonte: \*Zanin et al. (2021)

#### 3.2 Análise do Colapso

Após a organização dos dados coletados, foi possível construir a curva de adensamento, Figura 3, com o índice de vazios normalizado, e calcular o índice de colapso para os três corpos de prova realizados e pôde-se obter o comparativo, conforme a Tabela 4, com os dados coletados por Zanin et al. (2021), observando um aumento significativo deste índice nas tensões analisadas.

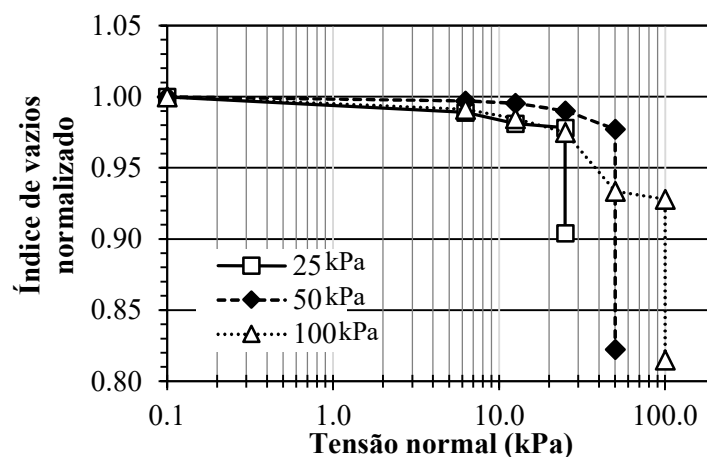


Figura 3. Curvas de adensamento

Tabela 4. Comparativo dos índices de colapso com e sem a influência bacteriana.

Tensão (kPa)	Ic com CV16 (%)	Ic sem CV16 (%)*
25	3,74	1,79
50	7,83	6,86
100	5,87	4,45

Fonte: \*Zanin et al. (2021).

Sabe-se que a potencialidade de colapso está diretamente relacionada ao índice de vazios e, conforme descrito pela Tabela 3, é possível perceber que houve um aumento deste parâmetro no solo estudado, em comparação ao estudado por Zanin et al. (2021) visto que a heterogeneidade do solo é grande, justificando então o aumento do índice de colapso.

### 3.2.1 Análise por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com a conclusão dos ensaios, foi possível encaminhar as amostras para a análise em MEV, e observar o crescimento bacteriano e seu comportamento com as partículas de solo, conforme Figura 4.

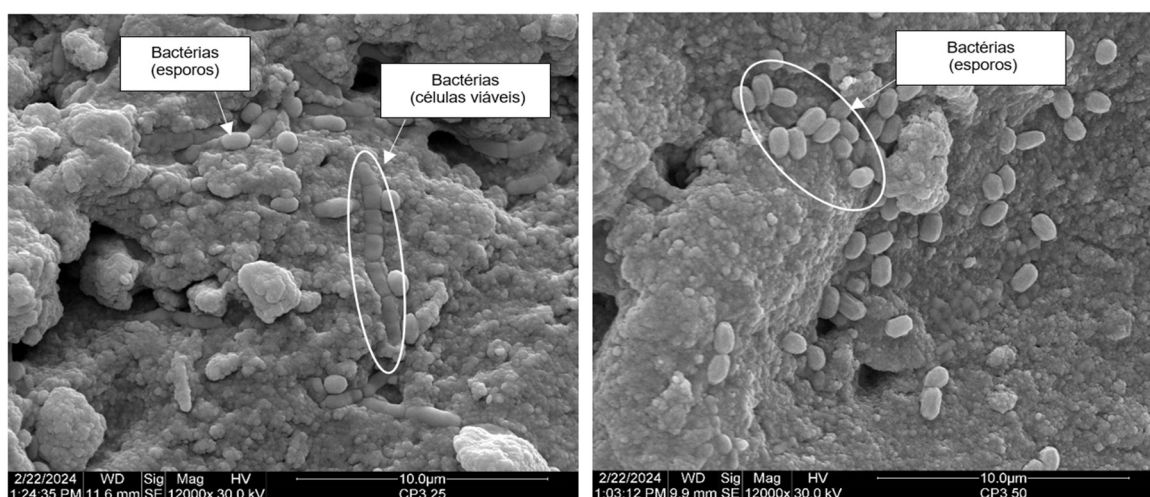


Figura 4. Análise de MEV em CP ensaiado a (a) 25kPa e (b) 50 kPa.

Embora tenha sido encontrada a presença das bactérias em formato de esporos e células viáveis, não foi possível detectar visualmente a presença dos cristais de calcita, substância que confere a biocimentação, como visto previamente por Canakci et al. (2015).

A ausência da calcita possui algumas possíveis justificativas. Dentre elas, a primeira seria insuficiência de fonte de cálcio para sua produção, conferindo que, a porcentagem de presença de cálcio presente naturalmente no solo, como estudado por Gonçalves et al. (2018), não foi suficiente para a produção do carbonato de cálcio. Uma solução para isso seria adicionar uma fonte de cálcio no meio de cultura da bactéria, como por exemplo o lactato, nitrato, glutamato, acetato ou cloreto de cálcio.

Uma outra hipótese pode ter sido o tempo de cura. O tempo deixado foi de 3 dias após o último ciclo de percolação da bactéria, até o ensaio de adensamento inundado, como realizado por Sharma e Ramkrishnan (2016) e Hasriana et al. (2018). No entanto, dadas as condições de temperatura e umidade do local em que foi realizado o experimento, um tempo maior de cura poderia resultar em um melhor desenvolvimento da bactéria, aumentando a precipitação de calcita.

### 3.2.2 Análise por Difração de Raio X (DRX)

Para compreender mais a fundo a influência da bactéria CV16, foi feita a análise por Difração de Raios-X (DRX), para que os principais constituintes mineralógicos das amostras pudessem ser determinados e comparados com os dados já existentes para o solo de Londrina. Os resultados estão exibidos na Figura 5. Como pode-se perceber, de fato, não foi encontrada a presença do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Sendo assim, é possível concluir que as bactérias não tiveram tempo hábil para utilizarem o cálcio naturalmente encontrado

no solo para sua precipitação ou a quantidade de Ca presente foi insuficiente, de tal forma que o pouco de  $\text{CaCO}_3$  produzido não pôde ser identificado na difração.

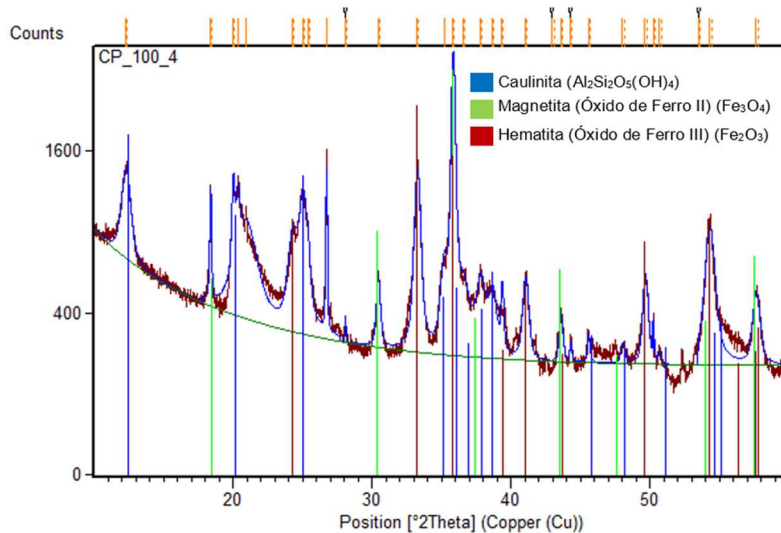


Figura 5. Análise de Difração de Raio X (DRX)

Recomenda-se, em trabalhos futuros, a aplicação de análises químicas complementares, como Fluorescência de Raios X (FRX) e Espectroscopia de Raios X por Dispersão de Energia (EDS), para quantificação direta de carbonato de cálcio em amostras biotratadas. Essas técnicas poderiam confirmar a presença de  $\text{CaCO}_3$  mesmo em concentrações reduzidas, fortalecendo os resultados apresentados.

#### 4 CONCLUSÕES

Este estudo avaliou a aplicação da bactéria *Bacillus subtilis* na biocimentação de um solo argiloso colapsível do município de Londrina-PR, por meio de ensaios edométricos com inundação. As amostras foram tratadas com solução bacteriana ( $10^7$  esporos/mL) por percolação, com três dias de cura, e submetidas a diferentes tensões, sendo inundadas em 25, 50 e 100 kPa. Os índices de colapso obtidos nas amostras tratadas foram de 3,74 %, 7,83 % e 5,87 %, enquanto as amostras de referência, sem o tratamento, apresentaram valores de 1,79 %, 6,86 % e 4,45 %, respectivamente. Esses resultados demonstram que, nas condições aplicadas, a presença da bactéria não promoveu a redução esperada do colapso — ao contrário, os valores tratados foram ligeiramente superiores aos de referência. Além disso, os índices de vazios finais permaneceram elevados ( $\geq 1,89$ ), indicando que não houve compactação adicional induzida pelo processo.

As análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) revelaram a presença de bactérias viáveis aderidas às partículas do solo, mas sem a formação visível de pontes de calcita. As análises DRX também não identificaram picos relacionados ao carbonato de cálcio, sugerindo que, embora houvesse bioatividade, a bioprecipitação não foi efetiva. Essa limitação pode estar relacionada à baixa disponibilidade natural de cálcio no solo e ao tempo de cura reduzido. Ainda assim, observou-se uma redução gradual no volume de percolado ao longo dos ciclos de aplicação, o que pode indicar o início de processos de bioentupimento (*bioclogging*), potencialmente por fases amorfas ou incipientes de carbonato.

Diante desses achados, conclui-se que a técnica possui potencial para uso em solos argilosos, mas requer adaptações importantes. Recomenda-se, para pesquisas futuras, a inserção de fontes externas de cálcio, como cloreto ou nitrato de cálcio, no meio de cultura bacteriano, bem como a avaliação de métodos alternativos de aplicação da solução, como injeção pressurizada ou técnicas eletrocinéticas.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, U. R. (2019). *Previsão e controle das fundações: uma introdução ao controle de qualidade em fundações* (3ª ed.). Blucher.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). *NBR 16853: Solo — Ensaio de adensamento unidimensional* (1ª ed.). ABNT.





- Calai, N. D. (2021). *Biocimentação em solo argiloso residual de basalto* (Dissertação de mestrado, Universidade de Passo Fundo).
- Canakci, H., Sidik, W., & Kilic, I. H. (2015). Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil. *Soils and Foundations*, 55(5), 1211–1221. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.020>
- Cavalcante, E. H., Danziger, F. A. B., Giacheti, H. L., Coutinho, R. Q., Souza, A., Kormann, A. C. M., Belincanta, A., Pinto, C. de S., Costa Branco, C. J. M., Ferreira, C. V., Carvalho, D. de, Marinho, F. A. M., Cintra, J. C. Â., Dourado, K. C. de A., Moraes, L. S. de, Albuquerque Filho, L. H., Almeida, M. de S. S., Gutierrez, N. H. M., Albuquerque, P. J. R. de, Chamecki, P. R., Cunha, R. P. da, Teixeira, R. S., Menezes, S. M., & Lacerda, W. A. (2007). Campos experimentais brasileiros. *Geotecnia*, (111), 99–205.
- DeJong, J. T., Fritzges, M. B., & Nüsslein, K. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(11), 1381–1392. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2006\)132:11\(1381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:11(1381))
- Gonçalves, F., Zanin, R. F. B., Somera, L. F., Oliveira, A. D., Ferreira, J. W. S., Costa Branco, C. J. M., & Teixeira, R. S. (2018). Caracterização físico-química e mineralógica de três solos do Estado do Paraná. In *Anais do XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2018* (pp. 1–8). Salvador.
- Hasriana, S. L., Samang, L. L., Djide, M. N., Harianto, T. (2018). *A study on clay soil improvement with Bacillus subtilis bacteria as the road subbase layer*. *International Journal of GEOMATE*, 15(52), 114–120. <https://doi.org/10.21660/2018.52.97143>.
- Jennings, J. E.; Knight, K. (1957). The additional settlement of foundations due to a collapse of structure of sand subsoils on wetting. In: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 4., 1957, Londres. Proceedings [...]. Londres: ISSMFE, 1957. p. 316-319.
- Mortensen, B. M., Haber, M. J., DeJong, J. T., Caslake, L. F., & Nelson, D. C. (2011). Effects of environmental factors on microbial induced calcium carbonate precipitation. *Journal of Applied Microbiology*, 111(2), 338–349. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2011.05065.x>
- Oliveira, A. D., Lanza, V. A. S., Mello, G. T. S., Crippa, M. T., & Dal-Col, P. H. L. (2024). Influência de duas diferentes profundidades na permeabilidade de solos argilosos lateríticos. In *Anais do XXI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica – COBRAMSEG 2024* (pp. 1–8). Balneário Camboriú.
- Qabany, A. A., Soga, K., & Santamarina, C. (2012). Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 138(8), 992–1001. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000666](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666)
- Sharma, A., & Ramkrishnan, R. (2016). Study on effect of microbial induced calcite precipitates on strength of fine grained soils. *Perspectives in Science*, 8, 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.pisc.2016.03.017>
- Sisakht, B. N., Nikooee, E., Habibagahi, G., & Niazi, A. (2015). Stabilisation of collapsible soils: a biological technique. In *Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development* (Vol. 5, pp. 2829–2834).
- Stefaniak, K., Wierzbicki, J., Ksit, B., & Szymczak-Graczyk, A. (2023). Biocementation as a pro-ecological method of stabilizing construction subsoil. *Energies*, 16(6), 2849. <https://doi.org/10.3390/en16062849>
- Sun, X., et al. (2020). The application of bio-cementation for improvement in collapsibility of loess. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1–12.
- Teixeira, C. Z. (1993). *Comportamento de estacas escavadas em solos colapsíveis* (Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo).
- Teles, I. B., & Florentino, L. A. (2022). A biocimentação promovida por bactérias na recuperação de concreto e estabilização de solos. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, 10(77), 1–16.
- Zanin, R.F.B., Padilha, A.; Pelaquim, F.; Gutierrez, N.; Teixeira, R. (2021). The effect of pH and electrical conductivity of the soaking fluid on the collapse of a silty clay. *Soils And Rocks*, [S.L.], v. 44, n. 4, p. 1-11, 26. ABMS - Brazilian Association for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. <http://dx.doi.org/10.28927/sr.2021.061620>.