

Artículo

Aplicación de la precipitación de carbonatos inducida por microbios para Control de desintegración del suelo residual de granito

Xiaoyan Luo¹, Ying Qi Feng², Chunjun Li¹ y Weiping Liu^{2,*}

¹ Escuela de Ingeniería Civil y Arquitectura, Universidad Normal de Ciencia y Tecnología de Jiangxi, Nanchang 330013, China; luoxiaoyan2@126.com (XL); lichunjun2001@126.com (CL)

² Escuela de Ingeniería de Infraestructura, Universidad de Nanchang, Nanchang 330031, China; sdtcfyq@163.com

* Correspondencia: liuweiping@ncu.edu.cn

Resumen: El suelo residual de granito está ampliamente distribuido en el sureste de China. Estos suelos presentan características mecánicas como grietas ricas y sueltas y fácil desintegración, lo que provoca graves desastres de erosión del suelo en condiciones de lluvia. La precipitación de carbonatos inducida por microbios (MICP) es una alternativa ecológica para la estabilización del suelo. En este estudio se propone una nueva estrategia para el control de la desintegración de suelos residuales de granito utilizando tecnología MICP. Los efectos de la concentración de la solución bacteriana, la concentración de la solución de cementación y el ciclo de tratamiento se investigan mediante una prueba de desintegración. Los parámetros óptimos de tratamiento de suelos residuales graníticos mediante tecnología MICP se determinan mediante el análisis de los procesos de desintegración y los indicadores de calidad residual de la desintegración. Los resultados muestran que las muestras tratadas tienen tres tipos de desintegración: desintegración completa, desintegración incompleta y no desintegración. El carbonato de calcio precipitado (CaCO_3) une las partículas del suelo y llena los poros. Teniendo en cuenta la efectividad y el costo y una concentración de solución bacteriana $\text{DO600} = 0,75$, cinco ciclos de tratamiento MICP con una concentración de solución de cementación de 1,2 mol/L son óptimos para el control de la desintegración del suelo residual de granito. Los efectos de la acción de cementación del CaCO_3 se verifican mediante pruebas de microscopía electrónica de barrido (SEM) con un espectroscopio de rayos X de energía dispersiva (EDX). Estos hallazgos sugieren que MICP es un candidato prometedor para controlar la desintegración del suelo residual de granito.

Palabras clave: suelo residual granítico; precipitación de carbonatos inducida por microbios; desintegración; concentración de solución bacteriana ; concentración de la solución de cementación; ciclo de tratamiento



Cita: Luo, X.; Feng, Y.; Li, C.; Liu,

W. Aplicación de la precipitación de carbonatos

inducida por microbios para el control

de la desintegración de suelos residuales de

granito. *Aplica. Ciencia*. 2024, 14, 6343. [https://](https://doi.org/10.3390/app14146343)

doi.org/10.3390/app14146343

Editor académico: Syed Minhaj
Saleem Kazmi

Recibido: 3 de mayo de 2024

Revisado: 15 de junio de 2024

Aceptado: 2 de julio de 2024

Publicado: 20 de julio de 2024



Copyright: © 2024 por los autores.
Licenciario MDPI, Basilea, Suiza.

Este artículo es un artículo de acceso abierto.
distribuido bajo los términos y

condiciones de los Creative Commons

Licencia de atribución (CC BY)

(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

El suelo residual de granito se forma mediante una serie de erosión física y química de la roca de granito madre, que se distribuye ampliamente en el sureste de China. Este tipo de suelo presenta grietas ricas y sueltas y una fácil desintegración [1–3], lo que resulta en una severa erosión del suelo en condiciones de lluvia [4–6]. Hay 239.125 sitios en Benggang que cubren un área de 1220,05 km² [7,8], con una tasa promedio de erosión de 590.000 t/(km² · y) [9]. Benggang tiene las características de una alta intensidad de erosión y una extensa área de erosión [10,11]. El condado de Yudu, uno de los condados con severa erosión del suelo en la provincia de Jiangxi, China, representa el 29,17% de todo el condado debido a Benggang.

Los métodos tradicionales de protección de taludes en las áreas de Benggang se basan principalmente en medidas de planta y medidas de ingeniería, que tienen desventajas como una gran cantidad de ingeniería, construcción inconveniente, alto costo y largo tiempo [12–14]. Por lo tanto, es de gran importancia desde el punto de vista de la ingeniería encontrar una nueva estrategia de protección de pendientes que ahorre energía, sea respetuosa con el medio ambiente y fácil de construir sobre suelo residual de granito. La precipitación de carbonatos inducida por microbios (MICP) es una de las tecnologías de ingeniería geotécnica emergentes en los últimos años [15,16]. MICP tiene tres sustancias típicas involucradas en su proceso: bacterias, sustrato y fuente de calcio, que precipita cristales de carbonato alrededor de las partículas del suelo en una reacción biológica, remodelando así la estructura del suelo

sobre una bacteria productora de ureasa enriquecida en el suelo llamada *Sporosarcina pasturii* (ATCC 11859), utiliza urea como sustrato, cataliza la hidrólisis de la urea para NH_4^+ y CO_3^{2-} generar NH_4 a través del metabolismo y atrae Ca^{2+} a través de la carga negativa generada por macromoléculas como proteínas dentro de las bacterias, induciendo así la precipitación de CaCO_3 . No se producen sustancias tóxicas durante el proceso de unión, lo que indica que es un material de unión respetuoso con el medio ambiente [19,20]. El MICP también demuestra una gran aplicabilidad y estabilidad del agua, lo que puede mejorar eficazmente varios tipos de suelo, como suelo orgánico [21], loess [22], arena [23], relaves de hierro [24] y desierto [25]. Las mejoras que MICP tiene en los materiales geotécnicos también dependen de los factores que influyen en varios procesos de mineralización, como las fuentes de calcio [26], la concentración de la solución bacteriana [27], la concentración de la solución de cementación [28], la proporción de la solución de cemento [29], la edad de curado [30] y el valor de pH [24]. La formación de cristales de carbonato de calcio tiene un impacto significativo en las propiedades físicas y mecánicas del suelo tratado. El suelo tratado con MICP sigue siendo adecuado para el crecimiento de las plantas y su urea residual puede servir como nutriente [19]. Sin embargo, existen estudios limitados sobre la modificación MICP del suelo residual de granito en el área de Benggang para mejorar su capacidad de resistir la erosión pluvial.

Una forma importante de garantizar la prevención de la pérdida de suelo y agua en el área de erosión es mejorar la estabilidad del agua de la superficie del suelo, mejorando así su resistencia a la erosión. El suelo residual de granito de superficie poco profunda en el área de Benggang generalmente está suelto después de una erosión prolongada. Los cristales de carbonato de calcio generados por MICP pueden llenar los poros del suelo y su cementación mejora la fuerza de conexión entre las partículas del suelo [28]. Es crucial determinar los parámetros apropiados de MICP, como la concentración de la solución bacteriana y la concentración de la solución instrumental [23]. Por lo tanto, es necesario un análisis cuantitativo para la aplicación práctica de ingeniería del MICP en la prevención y control de la erosión del suelo.

La desintegración del suelo se refiere a la durabilidad del suelo cuando está en contacto con agua estancada y puede usarse para evaluar su estabilidad hídrica [31–33]. Liu y cols. [34] investigaron el comportamiento de desintegración del suelo residual de granito a lo largo de un perfil de meteorización típico de la ciudad de Xiamen en China. Sol y cols. [35] estudiaron las cantidades de desintegración y las proporciones de desintegración de muestras de suelo tratadas con cemento, cal viva y caolinita. Zhang et al. [36] revelaron que la relación de vacíos efectiva y las curvas características del agua del suelo son los principales factores de control que afectan la velocidad de desintegración. Liu y cols. [1] discutió las influencias combinadas de las fuertes lluvias y la lluvia ácida sobre las características de desintegración de los suelos residuales de granito. Sin embargo, las características de desintegración del suelo residual de granito tratado con tecnología MICP no han recibido suficiente atención. Es necesario estudiar los efectos de diversos factores de mineralización sobre los procesos de desintegración. Se deben obtener los parámetros óptimos del MICP para el control de la desintegración del suelo residual granítico.

En este artículo, se utiliza el método MICP para prevenir la desintegración del suelo residual de granito. Se lleva a cabo una serie de experimentos de desintegración considerando diferentes concentraciones de solución bacteriana, soluciones de cementación y ciclos de tratamiento de concentración para determinar los parámetros óptimos del método MICP. El mecanismo de influencia de MICP en la desintegración del suelo residual de granito se revela a partir de características microestructurales. En el futuro se investigará la capacidad de resistir la erosión provocada por fuertes lluvias. Este estudio preparará para la aplicación de la tecnología MICP en el control de la erosión de Benggang.

2. Materiales

2.1. Condiciones de muestreo

El suelo residual de granito se recogió de un área de erosión de Benggang a una profundidad de 0,5 m, ubicada en la ciudad de Gongjiang (25° 59'24" N, 115° 26'32" E), condado de Yudu, Jiangxi. Provincia, en el sur de China. La densidad seca natural es 1,50 g/cm³, la humedad límite líquida es 39,3%, la humedad límite plástica es 27,5%, el coeficiente de permeabilidad es 9,7 ×10⁻⁷ cm/s y la gravedad específica es 2,56. Se muestra la curva de distribución del tamaño de grano.

Como se muestra en la Figura 2, la prueba de desintegración se lleva a cabo usando un aparato de desintegración hecho en casa. Como se muestra en la Figura 2, la prueba de desintegración se lleva a cabo usando un aparato de desintegración hecho en casa. Este aparato de desintegración consta de cuatro partes: la estructura de soporte, aparato de ración. Este aparato de desintegración consta de cuatro partes: el marco de soporte, el dispositivo de fregadero, el dispositivo de soporte y el dispositivo de pesaje. El marco de apoyo es un trabajo, el dispositivo de fregadero, el dispositivo de soporte y el dispositivo de pesaje. El marco de soporte es un marco cúbico hecho de tubo cuadrado de acero inoxidable de 2,5 cm con un tamaño de 60 cm x60 cm x50 cm. El trabajo es una estructura cúbica hecha de tubo cuadrado de acero inoxidable de 2,5 cm con un tamaño de 60 cm x 60. El dispositivo del fregadero incluye una caja de agua termostática y una pequeña caja de vidrio en el interior con medidas de 40 cm x40 cm x25 cm y 30 cm x30 cm x25 cm, respectivamente. la desintegración

cm ×50 cm. El dispositivo de fregadero incluye una caja de agua termostática y una pequeña caja de vidrio en su interior con tamaños de 40 cm ×40 cm ×25 cm y 30 cm ×30 cm ×25 cm, respectivamente. La prueba de desintegración se realiza en un ambiente de agua estática y a temperatura constante. La prueba se lleva a cabo en un ambiente de agua estática y a temperatura constante. El soporte El dispositivo de soporte incluye una malla metálica y una cuerda delgada. El tamaño de apertura del dispositivo de malla metálica incluye una malla metálica y un hilo fino. El tamaño de apertura de la malla metálica utilizada para utilizar para soportar las muestras de suelo es de 0,9 cm. soportar las muestras de suelo es de 0,9 cm.

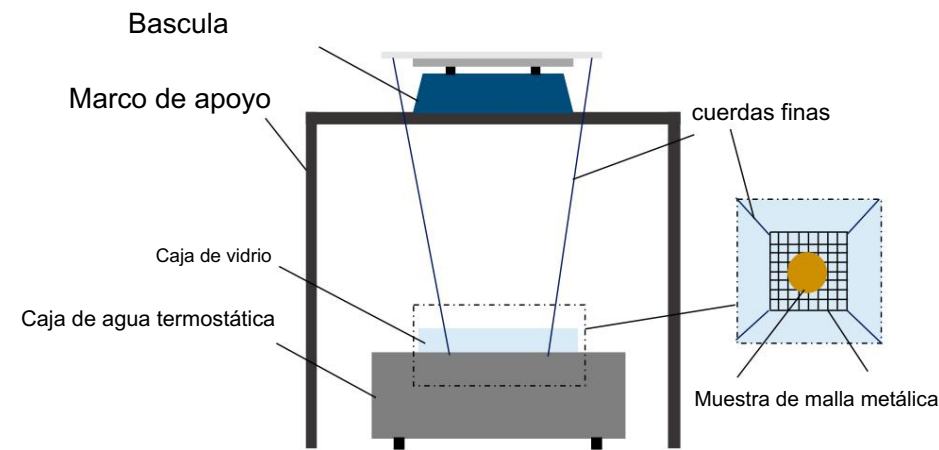


Figura 2. Diagrama esquemático del dispositivo experimental.

3.2. Procedimiento de prueba de desintegración

3.2.1. Preparación de la muestra

El suelo pasa por un tamiz de 2 mm de 2 mm. Luego se mete en una estufa para secar a 105 ° C. El contenido de humedad inicial se controla a un valor del 15%. Las muestras de prueba se remodelan. El Muestra de anillo cortando de 60 cm³. El suelo se compacta estáticamente hasta obtener una muestra seca de suelo objetivo de un anillo de corte de 60 cm³. El suelo se compacta estáticamente hasta que el suelo objetivo esté seco. densidad de 1,5 g/cm³. La muestra remodelada se coloca en una caja sellada con humedad constante para una densidad de 1,5 g/cm³. La muestra remodelada se coloca en una caja sellada con humedad constante para una 24 h para asegurar una distribución uniforme del agua. Se adopta el método de esterilización como tratamiento MICP durante 24 h para garantizar una distribución uniforme del agua. Se adopta el método de esterilización como MICP ment en la superficie de las muestras. El proceso de pulverización incluye dos pasos. En primer lugar, tratamiento de 10 ml en la superficie de las muestras. El proceso de pulverización incluye dos pasos. En primer lugar, 10 ml. Se rocía uniformemente una cantidad de solución bacteriana sobre la superficie de la muestra. Luego, las muestras se rocían uniformemente con una solución bacteriana sobre la superficie de la muestra. Luego, las muestras son curado en la caja de temperatura y humedad constantes (temperatura ambiente de 25 ° C ± 2 ° C, humedad del 85% ± 5%) durante 3 h para asegurar que las bacterias se propaguen y se multipliquen. En segundo lugar, 10 ml. Se rocían ml de solución de cementación sobre la misma superficie. Luego, se pulverizan las muestras sobre la misma superficie y se pulveriza la solución de cementación. Luego, las muestras se mantienen mantenido durante 21 h en la caja de temperatura y humedad constantes para garantizar una acción completa entre la solución bacteriana y la solución de cementación. El proceso de curado se muestra en la Figura 3. ure 3. Se rocía la solución bacteriana y la solución de cementación una vez es un ciclo. Este estudio presenta 1 ciclo de tratamiento MICP para investigar el efecto de varios ciclos de tratamiento 3, 5 y 7 ciclos de tratamiento MICP para investigar el efecto de varios ciclos de tratamiento en desintegración.

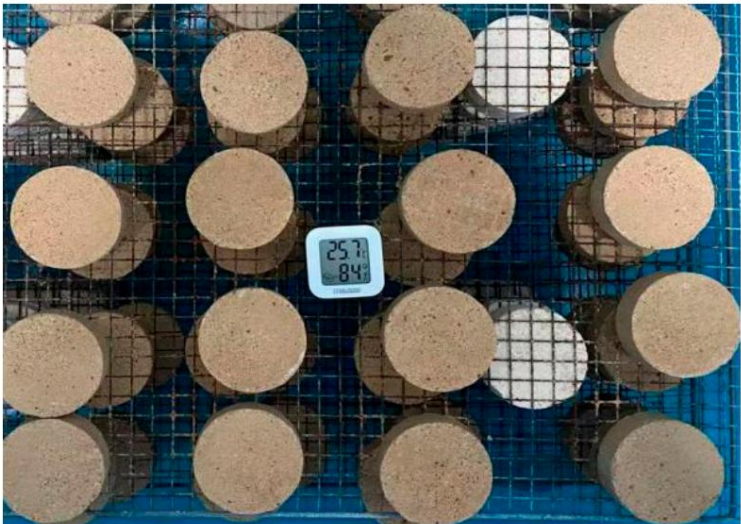


Figura 3. El proceso de curado.

3.2.2. Procesos de prueba

La prueba de desintegración se realiza a una temperatura del agua de 25 ° C. La muestra se coloca sobre la malla metálica. Durante la prueba, las muestras se dejan caer al agua. El peso se registra según un intervalo de tiempo de 5 s. Mientras tanto, la desintegración

3.2.2. Procesos de prueba

La prueba de desintegración se realiza a una temperatura del agua de 25 ° C. La muestra es colocado sobre la malla metálica. Durante la prueba, las muestras se dejan caer al agua. El El peso se registra según el intervalo de tiempo de 5 s. Mientras tanto, la cámara registra la morfología de desintegración de la muestra. Cuando la muestra se desintegra por completo o la lectura de la balanza cambia menos de 1 g en 10 minutos, la prueba finaliza.

3.3. Esquema experimental

Tres factores, incluida la concentración de la solución bacteriana, la solución de cementación la concentración y el ciclo de tratamiento se configuran en el esquema experimental. El Se utiliza agua desionizada en lugar de bacterias y cementación para rociar la muestra para el grupo de contraste sin tratamiento (E1 ~ E4). Se analizan los procesos de desintegración para obtener el parámetro óptimo. Los esquemas experimentales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Esquemas experimentales.

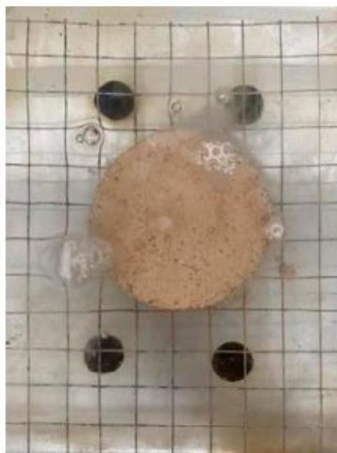
Numero de muestra	Solución bacteriana Concentración (OD600)	Solución de cementación Concentración (mol/L)	Ciclo de tratamiento
A1~A4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A5~A8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A9~A12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
A13~A16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	1
B1~B4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B5~B8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B9~B12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
B13~B16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	3
C1~C4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
C5~C8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
C9~C12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
C13~C16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	5
D1~D4	0,25	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
D5~D8	0,5	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
D9~D12	0,75	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
D13~D16	1.0	0,4, 0,8, 1,2, 1,6	7
E1~E4	0	0	1, 3, 5, 7

4. Resultados y discusión

4.1. Procesos de desintegración

Las características morfológicas de la muestra de suelo E3 sin tratamiento MICP se muestran en Figura 4. Cuando la muestra de suelo se sumerge en agua, aparecen numerosas burbujas en la superficie de la muestra de suelo, como se muestra en la Figura 4a. En esta etapa, la desintegración del suelo. La tasa es menor que la tasa de absorción de agua, lo que resulta en un aumento continuo en la lectura de balanza. Debido a la continua absorción de agua, la muestra de suelo se va satura. Posteriormente, se produce una desintegración violenta y aparecen grietas en la superficie de la muestra de suelo, como se muestra en la Figura 4b. La muestra colapsa desde el lado hacia el centro. Se generan grandes burbujas y el agua se vuelve turbia. En t = 300 s, el suelo casi cayó completamente al fondo de la caja (desintegración completa). El agua entra en los poros. entre las partículas del suelo, lo que lleva a un aumento en el contenido de humedad del suelo y una disminución en

Disminuyendo la tasa de absorción de agua, lo que resulta en un aumento continuo en la lectura del rendimiento. Debido a la continua absorción de agua, la muestra de suelo se satura gradualmente. Posteriormente, se produce una desintegración violenta y aparecen grietas en la superficie de la muestra de suelo, como se muestra en la Figura 4b. La muestra colapsa desde el lado hacia el centro. Se generan grandes burbujas y el agua se vuelve turbia. En $t = 300$ s, el suelo cayó casi por completo al fondo de la caja (desintegración completa). El agua ingresa a los poros entre las partículas del suelo, lo que provoca un aumento en el contenido de humedad del suelo y una disminución de la succión, lo que finalmente conduce a la desintegración. Los procesos de desintegración se suceden en tres procesos de succión que, en última instancia, absorben el agua, escapan y se desintegran en tres



(a) $t = 10 \text{ s.}$

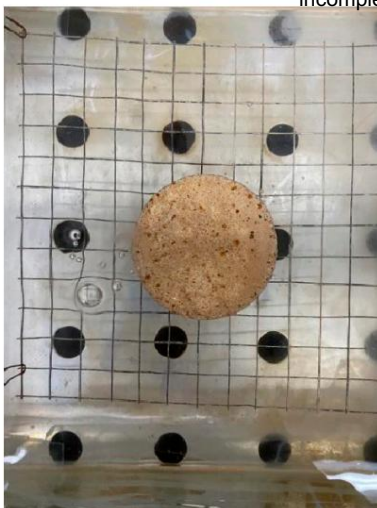


(b) $t = 60$ s.

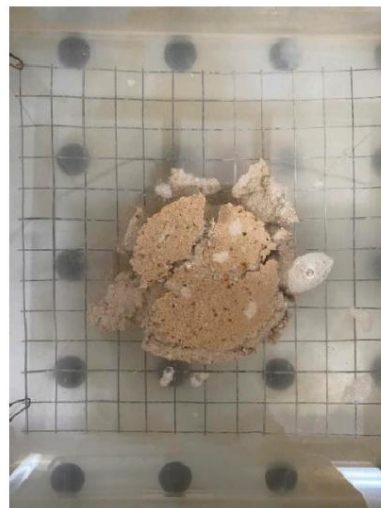


(c) $t = 300 \text{ s}$.

Figura 4. Proceso de desintegración sin tratamiento (desintegración completa).

[illegible]

(a) $t = 10 \text{ s}$.



(b) $t = 60 \text{ s}$.



(c) $t = 300$ s.

Figura 5. Proceso de desintegración de desintegración incompleta.

La muestra de suelo D11 no presenta procesos de desintegración tradicionales en 300 s. Después de que el agua ingresa a la muestra de suelo, solo ocurre un lento proceso de absorción de agua. Esto se debe a que la capa de refuerzo de la superficie de la muestra de suelo puede envolver completamente toda la muestra de suelo para evitar la desintegración después de múltiples ciclos de tratamiento MICP. Las capas en forma de corteza cubren las partículas del suelo, lo que tiene un impacto significativo en la interacción entre las partículas y reduce la erosión [37]. Sin embargo, el agua todavía puede infiltrarse lentamente, provocando un aumento de la

(c) $t = 300$ s.

Figura 5. Proceso de desintegración de desintegración incompleta.

(c) $t = 300$ s.

Figura 6. Proceso de desintegración de la no desintegración.

Las curvas de desintegración con tres ciclos de tratamiento se muestran en la Figura 8. Todas las muestras son del tipo de desintegración incompleta. Para concentraciones de solución de cementación de 0,4, 0,8 y 1,2, la masa residual de desintegración es la más alta cuando la solución bacteriana La concentración es 0,75. Al mismo tiempo, cabe señalar que el impacto de la bacteria La concentración de la solución varía según diferentes concentraciones de la solución de cementación. Cuando la concentración de la solución de cementación es 0,4, los efectos de refuerzo afectados por la La concentración de la solución bacteriana es $0,75 > 0,5 > 1,0 > 0,25$. Cuando la solución de cementación Las concentraciones son 0,8 y 1,2, respectivamente, los efectos de refuerzo de la solución bacteriana. La concentración es $0,75 > 1,0 > 0,5 > 0,25$. Cuando la concentración de la solución de cementación es 1.6, el efecto de refuerzo es más significativo debido al aumento de la solución bacteriana concentración. Sin embargo, la diferencia en el efecto refuerzo entre 0,75 y 1,0 no es significativo. Esto indica que la concentración de la solución bacteriana de 0,75 es más Adecuado para formar una capa de cierto espesor para reforzar las muestras de suelo.

capa después de un ciclo de tratamiento. Sin embargo, la capa de refuerzo es demasiado pequeña y delgada y por tanto no crea una mejora significativa.

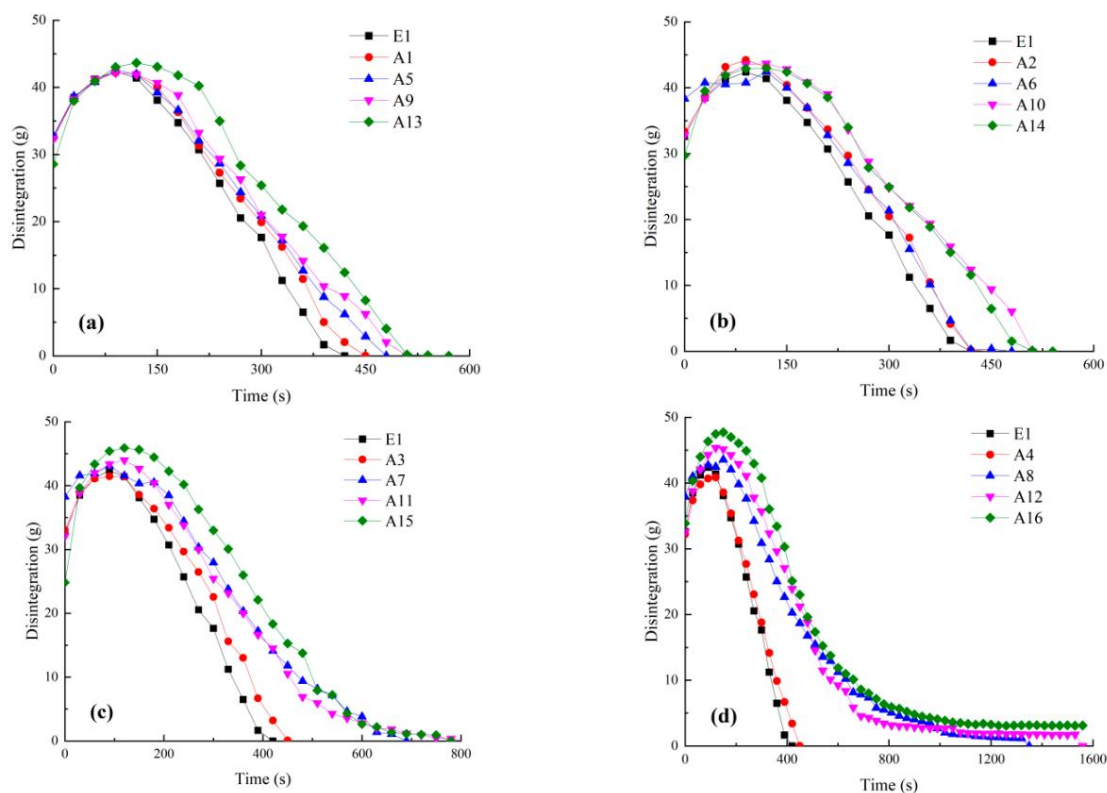


Figura 7. Curva de desintegración con un ciclo de tratamiento de diferentes concentraciones de solución bacteriana. (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 y (d) 1,6. (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 y (d) 1,6.

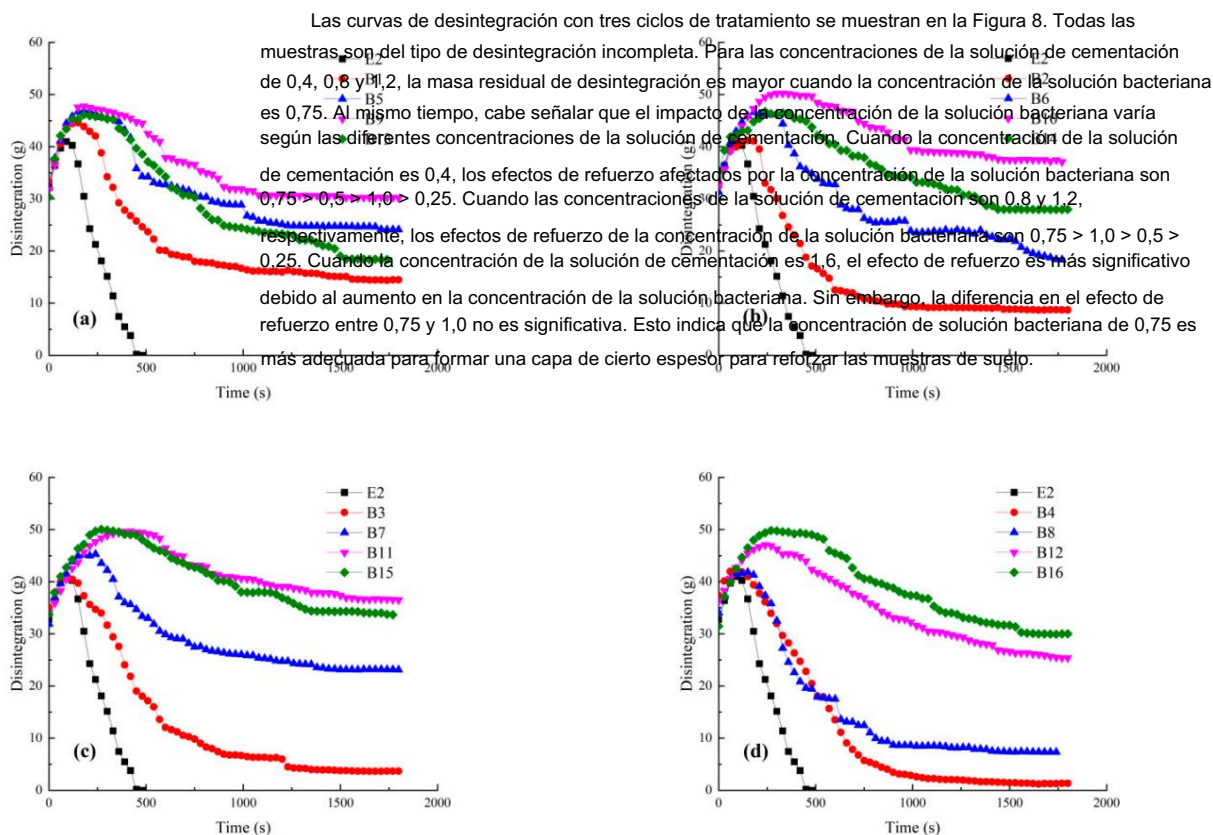


Figura 8. Curvas de desintegración con tres ciclos de tratamiento de diferentes concentraciones de solución bacteriana. (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 y (d) 1,6.

Debido al corto tiempo de tratamiento, la reacción MICP no se lleva a cabo completamente en un ciclo de tratamiento. A una concentración de solución de cementación más baja, cuando la concentración de la solución bacteriana es superior a 0,5, la reacción se puede llevar a cabo por completo. Esto conducirá a una reacción rápida. Si la concentración de la solución bacteriana es demasiado alta, se produce una gran cantidad de cristales de carbonato de calcio para llenar los minerales de la superficie del suelo. La capa de refuerzo solo queda en la superficie, lo que la hace

Debido al corto tiempo de tratamiento, la reacción MICP no se lleva a cabo completamente en un ciclo de tratamiento. A una concentración más baja de la solución de cementación, cuando la solución bacteriana La concentración es superior a 0,5, la reacción se puede llevar a cabo por completo. Esto conducirá a una reacción rápida. Si la concentración de la solución bacteriana es demasiado alta, una gran cantidad de Se producen cristales de carbonato de calcio para llenar los poros de la superficie del suelo. el refuerzo La capa solo permanece en la superficie, lo que dificulta que las bacterias y el cemento continúen. infiltrarse. Las curvas de desintegración con cinco y siete ciclos de tratamiento se muestran en Figuras 9 y 10, respectivamente. Algunas muestras presentan fenómenos de no desintegración después

Figura 8. Curvas de desintegración con tres ciclos de tratamiento de diferentes soluciones de cementación con cinco y concentración 0,4 (a) 0,8 (b) 1,2 (c) 1,6 (d). El efecto de la concentración de la solución bacteriana en las muestras tratadas varía según a diferentes ciclos de tratamiento. Después de múltiples ciclos de tratamiento, el efecto del MICP la reacción es limitada. Una combinación adecuada de la concentración de la solución bacteriana y la concentración de solución de cementación más baja, cuando la concentración de la solución bacteriana es mayor que 0,5, la reacción se puede llevar a cabo por completo. Esto conducirá a una reacción rápida. Si la condición condiona. Una concentración de solución bacteriana más baja es adecuada para concentraciones más bajas. La concentración de la solución bacteriana es demasiado alta, se produce una gran cantidad de cristales de carbonato de calcio en las concentraciones de la solución. Mientras tanto, cuando la concentración de la solución de cementación es $\leq 1,2$, para tener una mayor superficie de 0,75. Cuando la concentración de la solución de cementación es $\leq 1,2$, por lo que la solución difícil que las bacterias y el cemento sigan infiltrándose. Curvas de desintegración con cinco y 1,6, la solución bacteriana más adecuada es 1,0. Sin embargo, no hay mucha diferencia. En las Figuras 9 y 10, respectivamente, se muestran siete ciclos de tratamiento. Algunas muestras no presentan fenómenos de integración después de cinco y siete ciclos de tratamiento. Teniendo en cuenta el efecto del tratamiento y los beneficios económicos, la concentración de la solución bacteriana de 0,75 es eficaz en el refuerzo MICP de suelos residuales de granito.

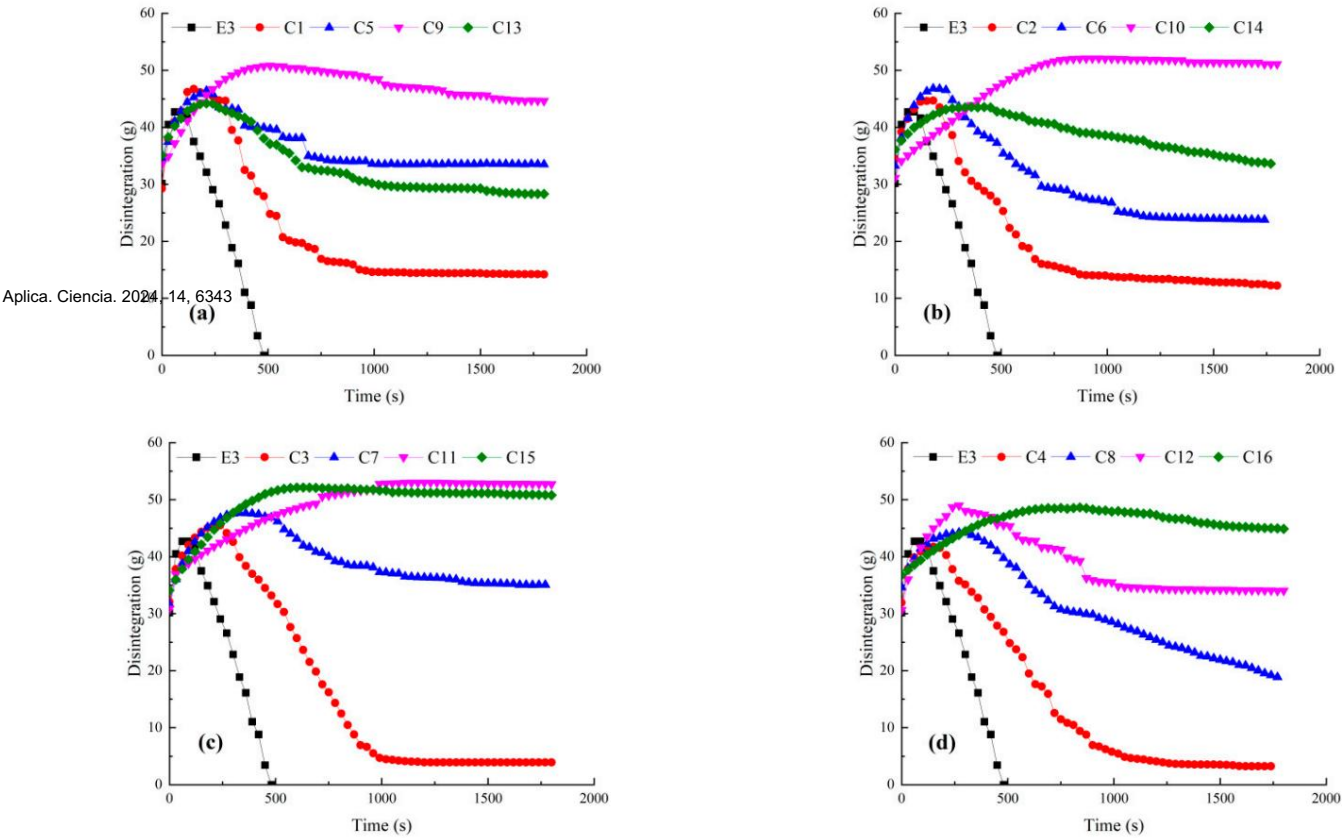


Figura 9. Curva de desintegración con cinco ciclos de tratamiento de diferentes concentraciones de solución de cementación: (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 y (d) 1,6. traciones: (a) 0,4, (b) 0,8, (c) 1,2 y (d) 1,6.

Durante la integración, las curvas de desintegración bajo diferentes concentraciones de solución de cementación de 0,4, 0,8, 1,2 y 1,6 mol/L se presentan para una concentración de solución bacteriana determinada. La curva de desintegración con un ciclo de tratamiento se muestra en la Figura 11. Cuando se lleva a cabo un ciclo de tratamiento, hay una mejora limitada en la capacidad de resistencia a la desintegración utilizando la tecnología MICP y la muestra se desintegra por completo.

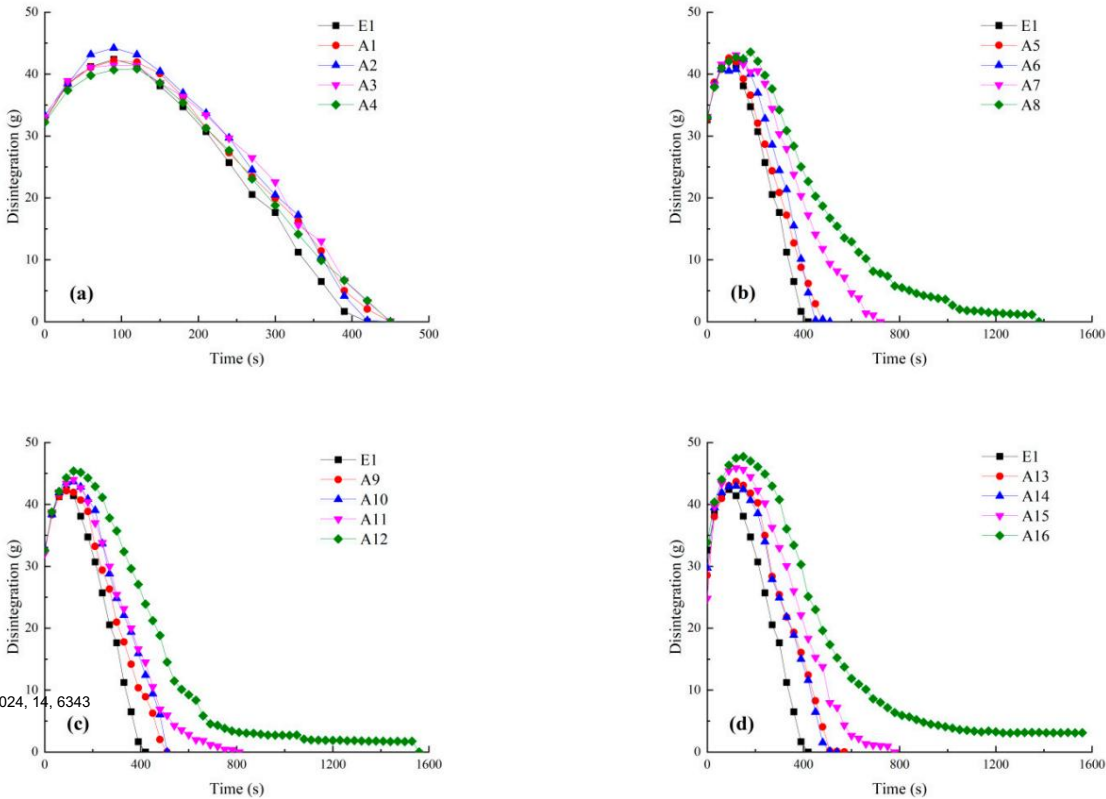


Figura 11. Curvas de desintegración final de ciclo de tratamiento de diferentes concentraciones de solución de cementación: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 y (d) 1,0.

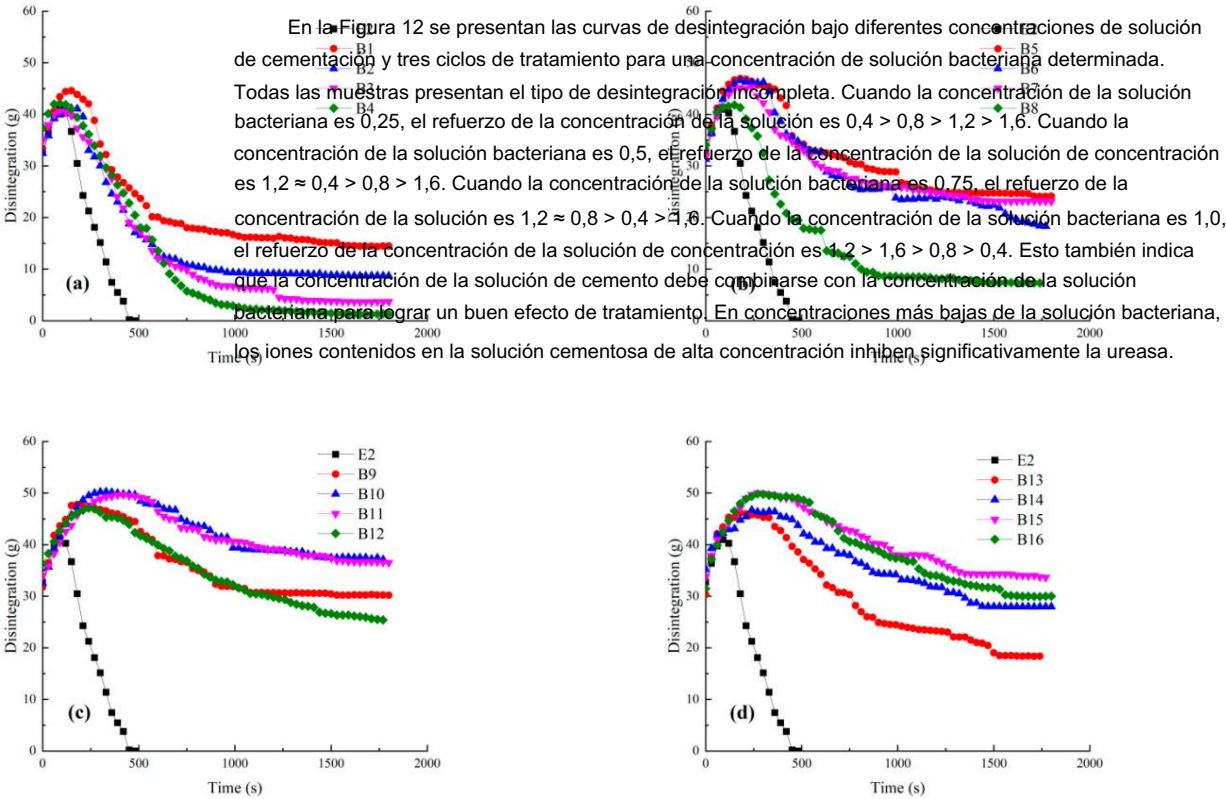


Figura 12. Curva de desintegración con tres ciclos de tratamiento de diferentes concentraciones de solución bacteriana: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 y (d) 1,0.

Después de cinco ciclos de tratamiento MICP, se genera una gran cantidad de cristales de CaCO_3 . Las curvas de desintegración de la concentración de la solución cementante con cinco y siete ciclos de tratamiento se presentan en las Figuras 13 y 14, respectivamente. Sin embargo, cuando la concentración de la solución bacteriana es 0,25, el efecto de unión general es deficiente, lo que es significativamente diferente de cuando la concentración de la solución bacteriana es superior a 0,5.

Después de cinco ciclos de tratamiento MICP, se genera una gran cantidad de cristales de CaCO_3 . Las curvas de desintegración de la concentración de la solución de cementación con cinco y siete Los ciclos de tratamiento se presentan en las Figuras 13 y 14, respectivamente. Sin embargo, cuando la concentración de la solución bacteriana es 0,25, el efecto de unión general es pobre, lo que es significativamente menor. diferente de cuando la concentración de la solución bacteriana es superior a 0,5. Por lo tanto, Al considerar la concentración óptima de la solución de instrumentación, solo se considerará el caso en el que se considera la concentración de solución bacteriana $\geq 0,5$. La solución de cementación óptima concentración 13 de 20 tiene un valor de 1,2 cuando la concentración de la solución bacteriana es $\geq 0,5$. Después tratamiento, una gran cantidad de CaCO_3 se une a las partículas circundantes y llena el huecos en las partículas del suelo.

Aplica. Ciencia. 2024, 14, 6343

Aplica. Ciencia. 2024, 14, 6343

La

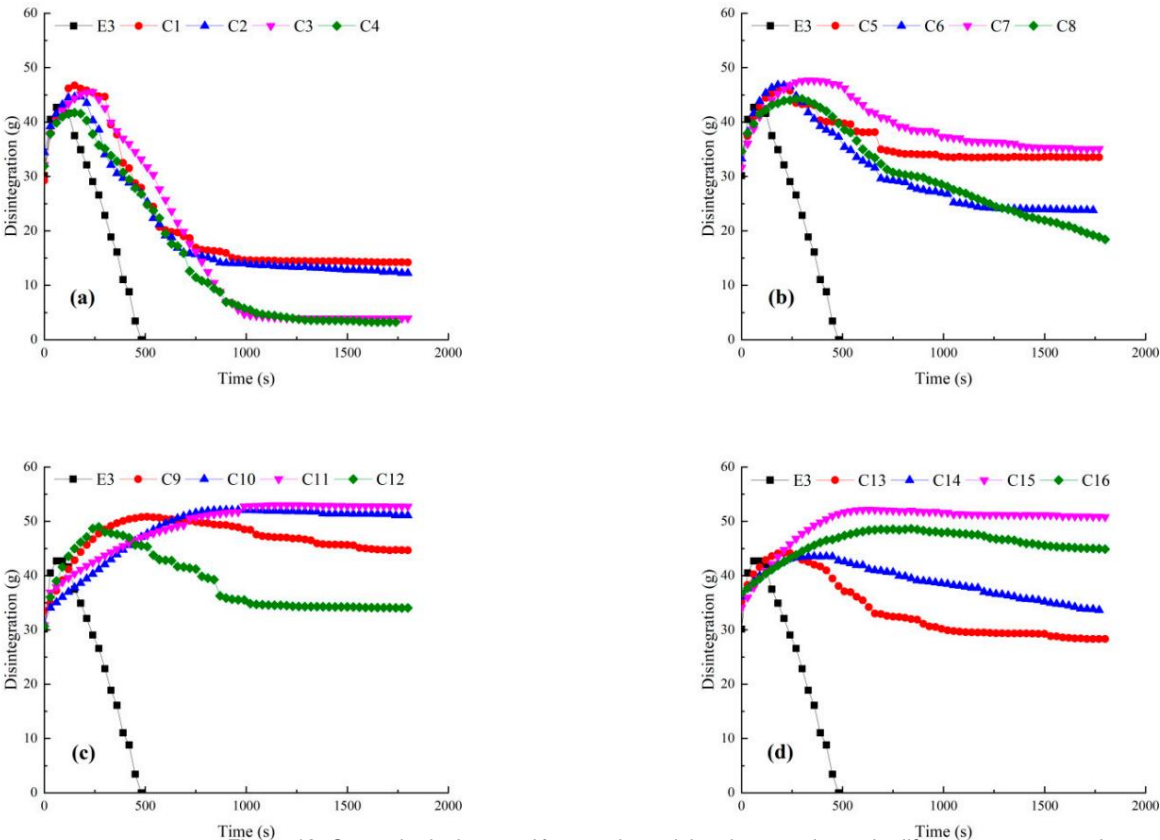


Figura 13. Curva de desintegración con cinco ciclos de tratamiento de diferentes concentraciones de solución bacteriana: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 y (d) 1,0.
Figura 14. Curva de desintegración con cinco ciclos de tratamiento de diferentes concentraciones de solución bacteriana: (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 y (d) 1,0.

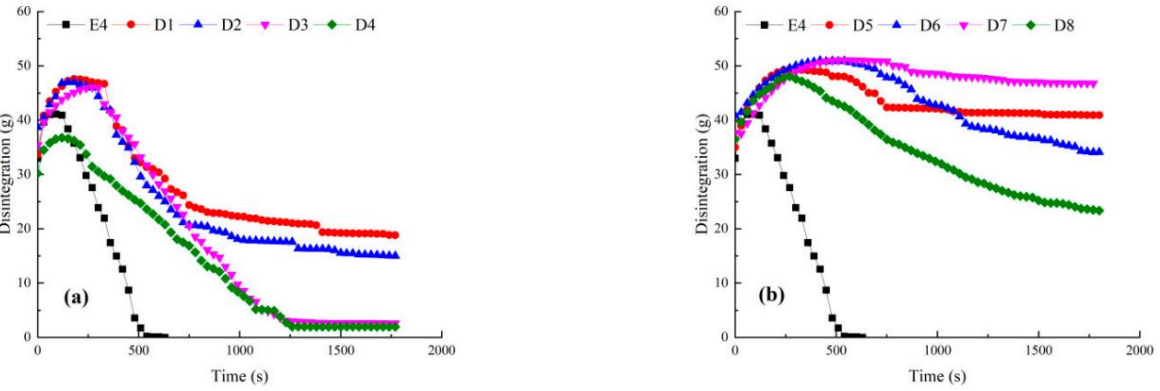
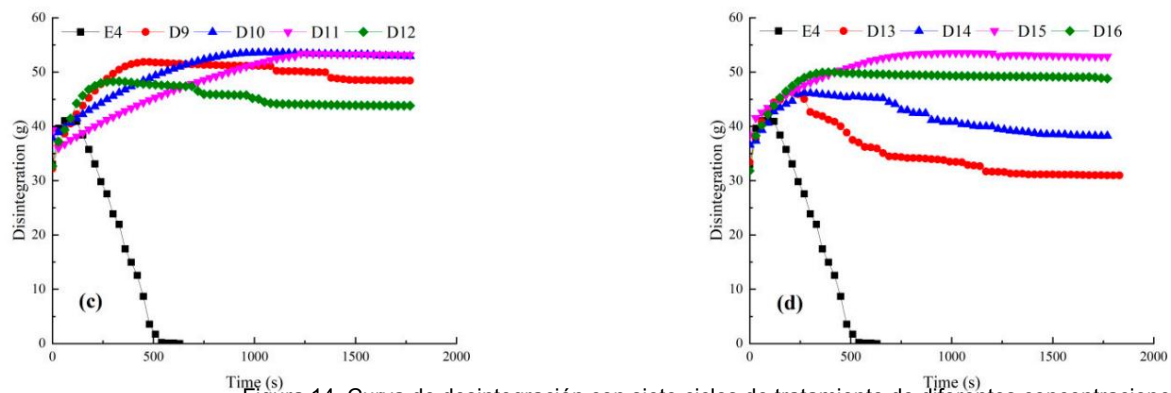


Figura 14. Continuación.



Time (s) Time (s)

Figura 14. Curva de desintegración con siete ciclos de tratamiento de diferentes concentraciones de

Figura 14. Curva de desintegración con siete ciclos de tratamiento de diferentes concentraciones de solución bacteriana : (a) 0,25, (b) 0,5, (c) 0,75 y (d) 1.0.

tracciones: (a) 0.25, (b) 0.5, (c) 0.75 y (d) 1.0.

4.4. Efecto del ciclo de tratamiento sobre la desintegración

4.4. Efecto del ciclo de tratamiento sobre la desintegración. Analizar el efecto del ciclo de tratamiento sobre el proceso de desintegración, la desintegración 4.4. Efecto del ciclo de tratamiento sobre la desintegración Para analizar el efecto del ciclo de tratamiento sobre el proceso de desintegración, se representarán las curvas de desintegración de muestras tratadas con los diferentes ciclos de tratamiento. En la Figura 15 se representan las curvas de desintegración de muestras tratadas con los diferentes ciclos de tratamiento.

15. A la concentración de solución bacteriana (BS) y la concentración de solución de cementación dadas, las curvas de concentración-gratificación de muestras de suelo tratadas con diferentes ciclos de tratamiento se representan en la Figura 16. Luego se puede analizar la cantidad de desintegración de 1, 3, 5 y 7 ciclos de tratamiento.

16. A la concentración de solución bacteriana (BS) y la concentración de solución de cementación (CS) dadas, se representan las Series A, Serie B, Serie C y Serie D corresponden a los ciclos de tratamiento de 1, 3, 5 y cion (CS), luego se puede analizar la cantidad de desintegración de 1, 3, 5 y 7 ciclos de tratamiento.

En la Figura 16, respectivamente Serie C y Serie D corresponden a los ciclos de tratamiento de 1, 3, 5 y 7. La Serie A, Serie B, Serie C y Serie D corresponden a los ciclos de tratamiento de 1, 3, 5 y en la Figura 15, respectivamente.

7 en la Figura 15, respectivamente.

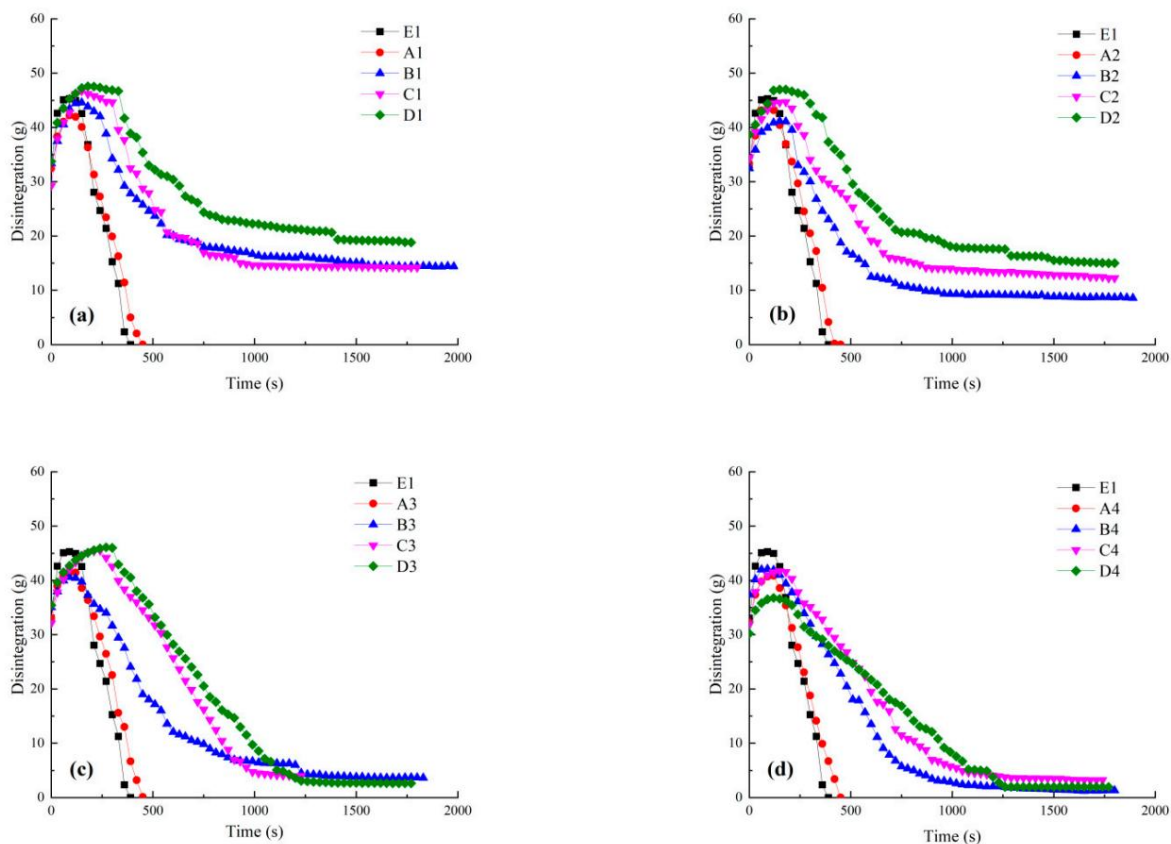


Figura 15. Continuación.

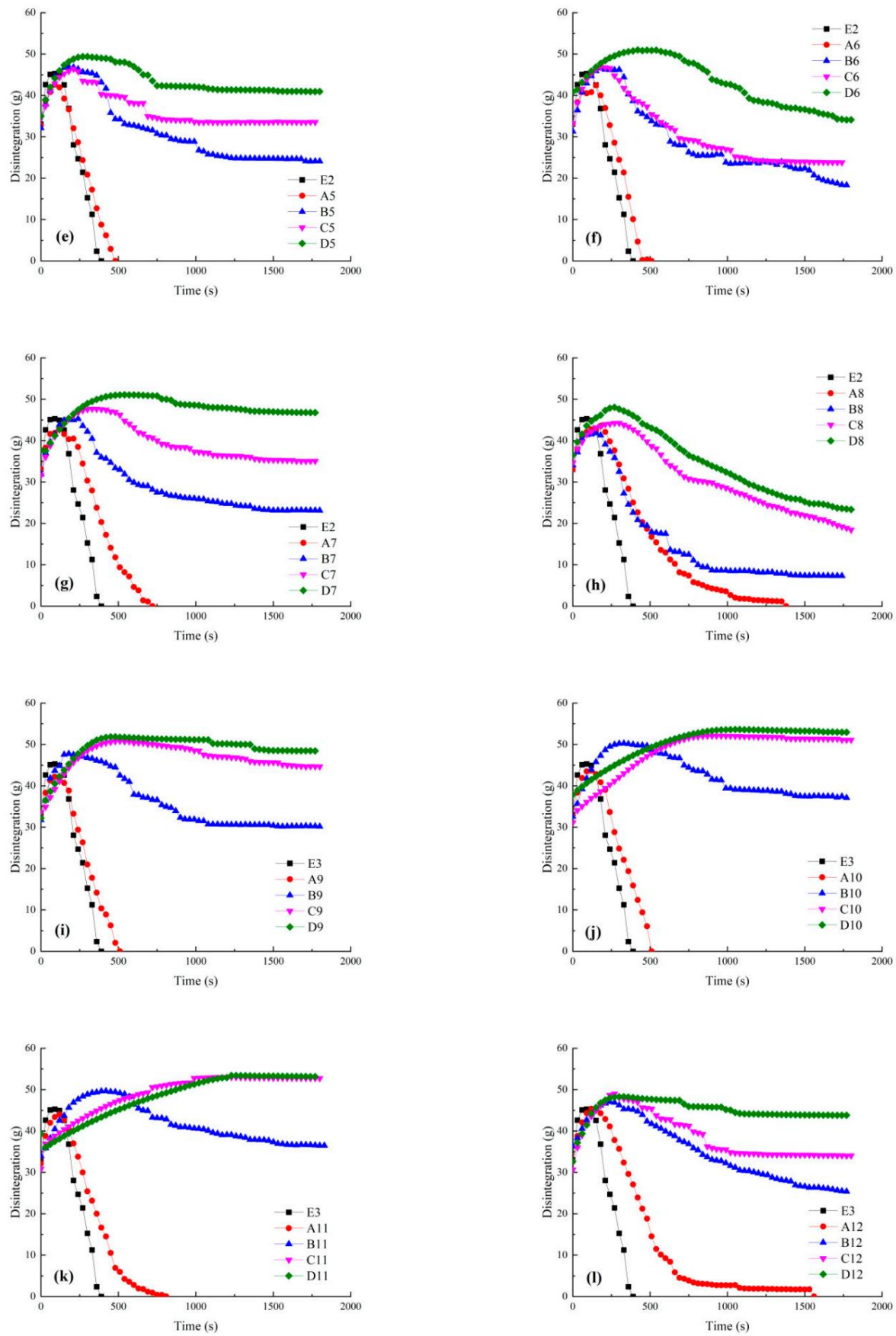


Figura 15. Continuación.

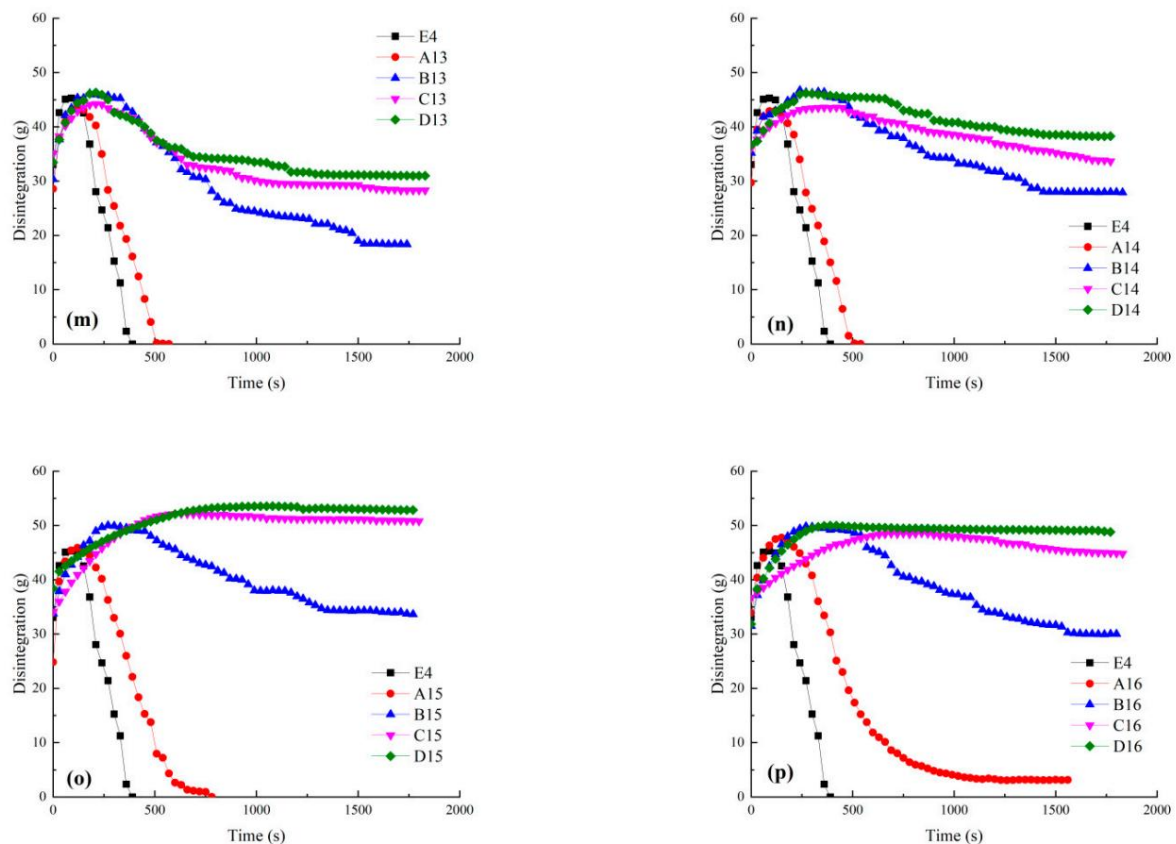


Figura 15. Curva de desintegración con diferentes ciclos de tratamiento: (a) BS 0,25, CS 0,4; (b) BS 0,25, CS 0,8; (c) BS 0,25, CS 1,2; (d) BS 0,25, CS 1,6; (e) BS 0,5, CS 0,4; (f) BS 0,5, CS 0,8; (g) BS 0,5, CS 1,2; (h) BS 0,5, CS 1,6; (i) BS 0,75, CS 0,4; (j) BS 0,75, CS 0,8; (k) BS 0,75, CS 1,2; (l) BS 0,75, CS 1,6; (m) BS 1,0, CS 0,4; (n) BS 1,0, CS 0,8; (o) BS 1,0, CS 1,2; (p) BS 1,0, CS 1,6.

A una determinada concentración de solución bacteriana y concentración de solución de cementación, cuantos más ciclos, mayor será el tiempo de desintegración. La capacidad de resistir la desintegración mejora con el aumento de los ciclos de tratamiento. No hay ningún cambio significativo en la capacidad de resistir la desintegración de la muestra después de un ciclo de tratamiento. La muestra sufre una desintegración completa. Después de tres ciclos de tratamiento, la muestra presenta una desintegración incompleta. La capacidad de suprimir la desintegración mejora aún más después de cinco ciclos de tratamiento. La formación de costras superficiales de microorganismos se vuelve más evidente al aumentar el número de tratamientos [39]. Las muestras de BS 0,75, CS 0,8; BS 0,75, CS 1,2; BS 1,0, CS 1,2; BS 1,0, CS 1,6 no presentan desintegración. La capacidad de resistir la desintegración de las muestras de BS 0,75, CS 0,8; BS 0,75, CS 1,2; BS 1,0, CS 1,2; BS 1,0, CS 1,6 tiene una mejora menor en comparación con el tratamiento de cinco ciclos. La razón de esto es que después de un tratamiento de cinco ciclos, la muestra forma una capa de cobertura suficiente, lo que dificulta que el líquido continúe infiltrándose. Cinco ciclos de tratamiento pueden completar eficazmente el proceso de refuerzo MICP del suelo residual de granito. Mientras tanto, la estructura del suelo no cambia con la pulverización, y una dura se forma en la superficie del suelo, lo que lo hace más adecuado para aplicaciones prácticas [40]. Se investigará la estabilidad mecánica y la capacidad de resistir la erosión provocada por fuertes lluvias. En el futuro se investigará la estabilidad mecánica y la capacidad de resistir la erosión causada por fuertes lluvias.

5. Microestructura de muestras de suelo

5. Microestructura de muestras de suelo

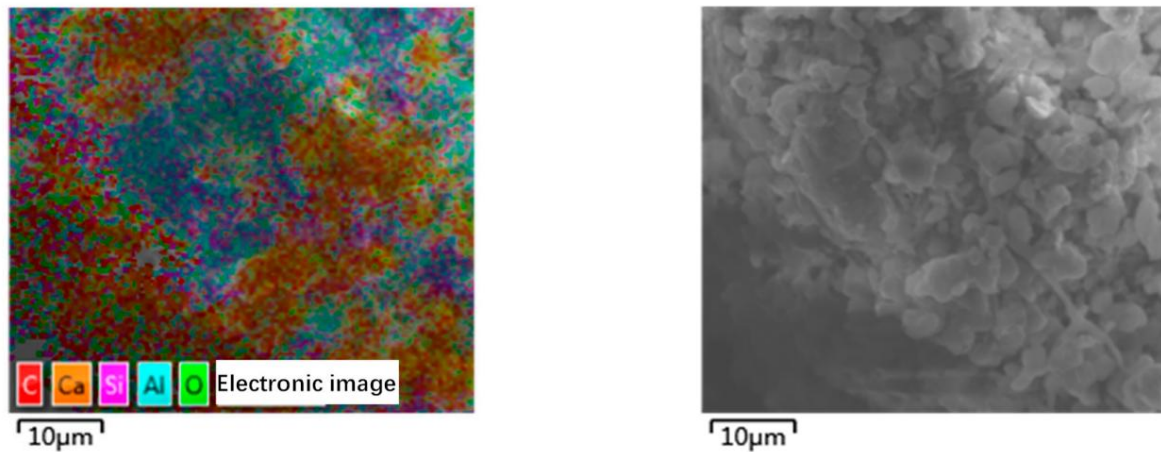
La tecnología MICP genera carbonato de calcio a través del metabolismo de las bacterias entre partículas de suelo para llenar los poros del suelo, mejorando así el rendimiento del suelo. Para analizar el efecto de la tecnología MICP en la estructura del suelo, se recolectaron muestras de suelo antes y después del tratamiento MICP. Las muestras de suelo se recolectaron de las superficies de las muestras de suelo. Para analizar el efecto de la tecnología MICP en la estructura del suelo, se recolectaron muestras de suelo antes y después del tratamiento MICP. Las muestras de suelo se recolectaron de las superficies de las muestras de suelo.

[illegible]

(d) Una ampliación del tratamiento de $10.000\times$

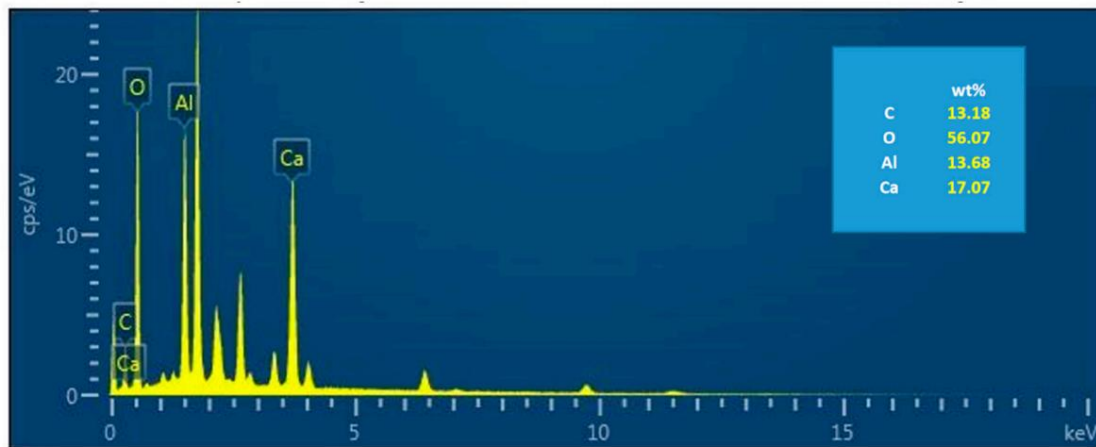
[illegible]

suelo. Las partículas del suelo. Por lo tanto, la imagen representa significativamente la unión de las partículas del suelo en la composición.



(a) Imagen en capas del elemento EDS.

(b) Imágenes SEM.



(c) Diagrama de contenido de elementos.

Figura 17. Diagrama de análisis del espectro energético EDS.

6. Conclusiones

En este estudio, se utilizó una estrategia de tecnología MICP para la integración de la solución bacteriana para la prevención de la erosión de Benggong. Los efectos de la concentración de la solución bacteriana, la concentración de la solución de cementación y el ciclo de tratamiento sobre la desintegración de las muestras se analizaron de la siguiente manera:

(1) La tecnología MICP (CaCO₃) en la preparación para el suelo de la muestra de granular puede generar una costra de carbonato cálcico (CaCO₃) entre las partículas del suelo. De esta manera, una costra se forma en la superficie que puede disminuir significativamente la desintegración.

(2) La concentración de la solución bacteriana de 0.75 g/L y la concentración de la solución de cementación de 1.2 g/L son las mejores para la integración. Una concentración insuficiente de la solución de cementación puede producir una baja concentración de solución de calcio que no es suficiente para la formación de una costra protectora. Un exceso de la solución de cementación puede provocar la formación prematura de una densa capa sobre la superficie, lo que inhibe la infiltración de la solución bacteriana y la generación de carbonato de calcio. Una concentración excesiva de la solución de cementación inhibe la actividad de la bacteria.

(3) Debido a la formación de una capa protectora suficientemente gruesa, cinco ciclos de MICP pueden suprimir eficazmente la desintegración. El espesor de la capa de refuerzo.

La capa generada por uno o tres ciclos de refuerzo no es suficiente para envolver completamente la superficie.

- (4) Se están realizando más investigaciones para investigar la estabilidad mecánica y la capacidad de resistir la erosión causada por fuertes lluvias. También es necesario considerar la durabilidad a largo plazo del suelo residual de granito cementado para lograr una regulación efectiva de la eficiencia de la reacción de mineralización.

Contribuciones de los autores: Conceptualización, XL y WL; escritura: preparación del borrador original, XL; investigación, YF; curación de datos, CL; redacción: revisión y edición, WL. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiamiento: Esta investigación fue financiada por la Fundación Nacional de Ciencias Naturales de China (Subvención No. 41962015) y la Fundación Natural de la Provincia de Jiangxi (Subvención No. 20161BAB203078).

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: No aplicable.

Declaración de Consentimiento Informado: No aplicable.

Declaración de disponibilidad de datos: las contribuciones originales presentadas en el estudio se incluyen en el artículo; más consultas pueden dirigirse al autor correspondiente.

Conflictos de intereses: Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

1. Liu, W.; Canción, X.; Huang, F. Estudio experimental sobre la desintegración de suelos residuales de granito bajo la influencia combinada de ciclos de mojado-secado y lluvia ácida. *Geomat. Nat. Riesgo de peligros* 2019, 10, 1912–1927. [\[Referencia cruzada\]](#)

2. Liu, X.; Qiu, J.; Zhang, D. Características de la escorrentía de la pendiente y el contenido de agua del suelo en el coluvión de benggang bajo lluvia simulada. *J. Sedimentos de suelos* 2018, 18, 39–48. [\[Referencia cruzada\]](#)

3. Deng, Y.; Shen, X.; Xia, D. Erodibilidad del suelo y propiedades fisicoquímicas de los abanicos aluviales de barrancos que colapsan en el sur de China. *Pedósfera* 2019, 29, 102–113. [\[Referencia cruzada\]](#)

4. Tang, Q.; Duan, X.; Él, L. Variabilidad y factores impulsores de la conductividad hidráulica saturada del suelo a lo largo de las direcciones horizontal y vertical en la cuenca superior de Benggang. *CATENA* 2023, 222, 106810. [\[CrossRef\]](#)

5. Xu, J. Benggang erosión: los factores que influyen. *CATENA* 1996, 27, 249–263.

6. Liang, Y.; Zhang, B.; Pan, X. Estado actual y estrategias integrales de control de la erosión del suelo en la región montañosa del sur. *Porcelana. Ciencia. Conservación del agua del suelo*. 2008, 6, 22–27.

7. Wei, Y.; Liu, Z.; Wu, X. ¿Se puede considerar a Benggang como una erosión de barrancos? *CATENA* 2021, 207, 105648. [\[CrossRef\]](#)

8. Liang, Y.; Ning, D.; Pan, X. Características y manejo de la erosión de Benggang en la región del suelo rojo del sur. *Conservación del agua del suelo. China* 2009, 1, 31–34.

9. Liao, Y.; Zheng, M.; Li, D. Relación del número de benggang, el área y los valores integrales hipsométricos en diferentes formas de relieve. *Etapas de desarrollo. Degradación de la tierra. Desarrollo*. 2020, 31, 2319–2328. [\[Referencia cruzada\]](#)

10. Liu, W.; Ouyang, G.; Luo, X. Contenido de humedad, presión de agua de poro y frente de humectación en suelo residual de granito durante el colapso erosión con ángulo de pendiente variable. *Geomorfología* 2020, 362, 107210. [\[CrossRef\]](#)

11. Liu, W.; Cui, Y.; Ouyang, G. Un estudio experimental sobre la influencia de la composición del tamaño de grano en el colapso de la erosión del granito. *suelo residual. CATENA* 2023, 223, 106949. [\[CrossRef\]](#)

12. Liao, Y.; Changyuan, T.; Zaijian, Y. Progreso de la investigación sobre la erosión de Benggang y sus medidas de prevención en la región del suelo rojo del sur de China. *Acta Pedol. Pecado*. 2018, 55, 1297–1312.

13. Zhu, X.; Liang, Y.; Qu, L. Características de la escorrentía y la producción de sedimentos para dos suelos erosionables típicos en el sur de China. En *t. J. Res. de sedimentos*. 2022, 37, 653–661. [\[Referencia cruzada\]](#)

14. Bullock, A.; King, B. Evaluación del programa de conversión de tierras en pendientes de China como gestión sostenible en los condados de Tianquan y Wuqi. *J. Medio Ambiente. Gestionar*. 2011, 92, 1916–1922. [\[Referencia cruzada\]](#)

15. van Paassen León, A.; Ghose, R.; van der Linden Thomas, JM Cuantificación de la mejora biomedida del suelo mediante ureólisis: experimento de biolechada a gran escala. *J. Geotecnología. Geoentorno. Ing.* 2010, 136, 1721–1728. [\[Referencia cruzada\]](#)

16. Portugal, CRMe; Fonyo, C.; Machado, CC Biocementación por precipitación de calcita inducida microbiológicamente, alternativa verde para las carreteras: ¿es este el gran avance? Una revisión crítica. *J. Limpio. Pinchar*. 2020, 262, 121372. [\[Referencia cruzada\]](#)

17. Phillips, AJ; Gerlach, R.; Lauchnor, E. Aplicaciones de ingeniería de biomineralización ureolítica: una revisión. *Bioincrustación* 2013, 29, 715–733. [\[Referencia cruzada\]](#)

18. Tang, CS; Zhu, C.; Cheng, Q. Agrietamiento por desecación de suelos: una revisión de los enfoques de investigación, los mecanismos subyacentes y factores de influencia. *Ciencias de la Tierra. Rev.* 2021, 216, 103586. [\[CrossRef\]](#)

19. Li, S.; Li, C.; Yao, D. Viabilidad de la precipitación de carbonatos inducida microbianamente y las barreras de tablero de paja sobre la desertificación. *control y restauración ecológica. Ecológico. Ing.* 2020, 152, 105883. [\[Referencia cruzada\]](#)

20. Liu, S.; Wang, R.; Yu, J. Eficacia de la antierosión de un revestimiento MICP en las superficies de tejas de arcilla antiguas. *Construcción Construir. Madre*. 2020, 243, 118202. [\[Referencia cruzada\]](#) 21.
- Çanakçı, H.; Sidik, W.; Kiliç, 'İH Efecto de la precipitación bacteriana de carbonato de calcio sobre la compresibilidad y la resistencia al corte del suelo orgánico. *Suelos encontrados*. 2015, 55, 1211–1221. [\[Referencia cruzada\]](#)
22. Cheng, Y.J; Tang, CS; Pan, XH Aplicación de precipitación de carbonatos inducida por microbios para el control de la erosión de la superficie con loess. *Ing. Geol.* 2021, 294, 106387. [\[Referencia cruzada\]](#)
23. Jiang, Nueva Jersey; Tang, CS; Yin, LY Aplicabilidad del método de calcificación microbiana para el control de la erosión superficial de pendientes arenosas. *J. Mater. Civilización. Ing.* 2019, 31, 04019250. [\[Referencia cruzada\]](#)
24. Lai, Y.; Yu, J.; Liu, S. Estudio experimental para mejorar las propiedades mecánicas de la arena de relaves de hierro mediante el uso de MICP a bajo pH. *Construcción Construir. Madre*. 2021, 273, 121729. [\[Referencia cruzada\]](#)
25. Meng, H.; Gao, Y.; Él, J. Precipitación de carbonatos inducida microbianamente para el control de la erosión eólica del suelo del desierto: pruebas a escala de campo. *Geoderma* 2021, 383, 114723. [\[CrossRef\]](#)
26. Wang, L.; Ren, Z.; Wang, H. Relaciones microestructura-propiedad en mortero de cemento con tratamiento superficial inducido por microbios. precipitación de carbonatos. *Compos. Parte B Ing.* 2022, 239, 109986. [\[Referencia cruzada\]](#)
27. Cheng, L.; Cord-Ruwisch, R.; Shahin, MA Cementación de suelos arenosos mediante precipitación de calcita inducida microbianamente en varios grados de saturación. *Poder. Geotecnología. J.* 2013, 50, 81–90. [\[Referencia cruzada\]](#)
28. Zhao, Q.; Pequeño.; Li, C. Factores que afectan la mejora de las propiedades de ingeniería del suelo tratado con MICP catalizadas por bacterias y ureasa. *J. Mater. Civilización. Ing.* 2014, 26, 04014094. [\[Referencia cruzada\]](#)
29. Tang, CS; Yin, LY; Jiang, Nueva Jersey Factores que afectan el rendimiento del suelo tratado con precipitación de carbonatos inducida por microbios (MICP): una revisión. *Reinar. Ciencia de la Tierra*. 2020, 79, 94. [\[Referencia cruzada\]](#)
30. Choi, SG; Chang, I.; Lee, M. Revisión sobre las propiedades de ingeniería geotécnica de arenas tratadas con calcio inducido microbianamente precipitación de carbonatos (MICP) y biopolímeros. *Construcción Construir. Madre*. 2020, 246, 118415. [\[Referencia cruzada\]](#)
31. Fajardo, M.; McBratney, AB; Field, DJ Evaluación del apagado del suelo mediante reconocimiento de imágenes. *Labranza del suelo Res.* 2016, 163, 119-129. [\[Referencia cruzada\]](#)
32. Ze, Z.; Vadim, P.; Svetlana, N. Características de desintegración de una marga arcillosa criolitogénica con diferente contenido de agua: Moscú marga de cobertura (prQIII), estudio de caso. *Ing. Geol.* 2019, 258, 105159. [\[Referencia cruzada\]](#)
33. Kasmerchak, CS; Mason, JA; Liang, M. Análisis de difracción láser de estabilidad y desintegración de agregados en bosques y pastizales. suelos del norte de Minnesota, EE.UU. *Geoderma* 2019, 338, 430–444. [\[Referencia cruzada\]](#)
34. Liu, X.; Zhang, X.; Kong, L. Desintegración de suelos residuales de granito con distintos grados de meteorización. *Ing. Geol.* 2022, 305, 106723. [\[Referencia cruzada\]](#)
35. Sol, Y.; Liu, Q.; Xu, HS Influencias de diferentes modificadores en la desintegración del suelo residual de granito mejorado en condiciones húmedas y ciclos secos. *En t. J. Min. Ciencia. Tecnología.* 2022, 32, 831–845. [\[Referencia cruzada\]](#)
36. Zhang, S.; Tang, HM Estudio experimental del mecanismo de desintegración de suelos residuales de granito insaturado. *Mec. de suelo rocoso*. 2013, 34, 1668–1674.
37. Meyer, F.; Bang, S.; Min, S.; Stetler, L.; Bang, S. Estabilización del suelo inducida microbiológicamente: aplicación de *Sporosarcina pasteurii* para el control del polvo fugitivo. *En Geo-Frontiers 2011: Avances en Ingeniería Geotécnica; Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles: Reston, VA, EE. UU., 2011; págs. 4002–4011.*
38. Wang, R.; Tang, CS; Pan, X.; Shen, Z.; Liu, Y.; Lu, X. Un enfoque biotecnológico para la eliminación de sólidos suspendidos en lodos de biogás mediante precipitación de calcita inducida microbianamente (MICP). *J. Limpio. Pinchar*. 2024, 459, 142537. [\[Referencia cruzada\]](#)
39. Katebi, H.; Fahmi, A.; Ouria, A.; Babaeian Amini, A.; Kafil, HS Tratamiento superficial microbiano de arena con *Sporosarcina pasteurii* para Mejorar la resistencia a la erosión eólica en el lago Urmia. *Aplica. Reinar. Ciencia del suelo*. 2021, 8893115. [\[Referencia cruzada\]](#)
40. Bruce Donald, A. Glosario de terminología de inyección. *J. Geotecnología. Geoentorno. Ing.* 2005, 131, 1534-1542. [\[Referencia cruzada\]](#)

Descargo de responsabilidad/Nota del editor: Las declaraciones, opiniones y datos contenidos en todas las publicaciones son únicamente de los autores y contribuyentes individuales y no de MDPI ni de los editores. MDPI y/o los editores renuncian a toda responsabilidad por cualquier daño a personas o propiedad que resulte de cualquier idea, método, instrucción o producto mencionado en el contenido.