XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul
GEOSUL 2019 – 17 a 19 de Outubro, Joinville, Santa Catarina, Brasil
©ABMS, 2019

Avances en geopolimerización, biocimentación y bioclogging: revisión del estado del arte

Jair de Jesús Arrieta Baldovino, MSc
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, yaderbal@hotmail.com

Yeimy Ordoñez Muñoz, BSc
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, yeordonez29@gmail.com

Ronaldo Luis dos Santos Izzo, DSc
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

Jessica Leindorf de Almeida, BSc
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, jessica.leindorf@gmail.com

RESUMEN: La geotecnología es una nueva rama de la ingeniería geotécnica que se ocupa de las aplicaciones de los métodos microbiológicos y químicos avanzados a los materiales geotécnico-geológicos utilizados en la ingeniería. El objetivo de estas aplicaciones es mejorar las propiedades mecánicas del suelo, para que sea más adecuado con fines de construcción o medioambientales. En el presente artículo son exploradas tres aplicaciones diferentes: geopolimerización, biocementación y bioclogging. La primera se basa en la estabilización de materiales geotécnicos mejorando sus propiedades mecánicas (a través de reacciones entre alúmina y sílice en medio alcalino), la biocementación genera unión entre partículas que ayudan a mejorar la resistencia al corte del suelo en campo, por otra parte, el bioclogging reduce los vacíos y la porosidad del suelo haciendo que disminuya sus capacidades de drenaje. Finalmente, en el presente artículo son analizados los casos de aplicación de cada una de las técnicas, sus procesos físicos y químicos, ventajas y desventajas, además de sus restricciones y aplicaciones en el campo geotécnico.

PALABRAS CLAVE: Geopolimerización, biocementación, bioclogging.

1 INTRODUCCIÓN

La geotecnología comprende en especial, las múltiples aplicaciones de las geociencias para la solución de problemas en la ingeniería y el aprovechamiento de los recursos naturales.

Actualmente, las biogeotecnologías están relacionadas principalmente con el control de erosión, protección y reducción de infiltración de agua en taludes. Además, la biogeotecnología aporta ventajas como son el ajo costo de inversión y mantenimiento.

Para Marques, Labrincha y Seabra (2013, p. 3): “La Geopolimerización o activación alcalina es un proceso de endurecimiento y estabilización de estructuras de base aluminosilicatada, alternativa complementaria de los sistemas ligantes comunes que utilizan cemento portland o cal”. Por ello, este proceso tiene aplicaciones innovadoras las cuales se sustentan en su mayor durabilidad.

Según Chu et al., (2014): “bioclogging es un proceso de llenado de los poros en el suelo, con minerales y otras sustancias que se generan de forma microbiana, para reducir la permeabilidad del suelo. Por otro lado, la biocementacion es un proceso que une las partículas del suelo con minerales y otras sustancias, para aumentar la

resistencia a la compresión". Aunque existen varias aplicaciones potenciales de microorganismos para la ingeniería geotécnica, en la actualidad, se concentran en procesos como el bioclogging y la biocementación.

La presente revisión tiene como objetivo resumir las aplicaciones existentes o potenciales en procesos de geopolimerización, bioclogging y biocementación, detallar los procesos físicos y químicos que ocurren en las tres técnicas y comparar las ventajas y desventajas.

2 GEOPOLIMERIZACIÓN

2.1 Aspectos generales

La geopolimerización es una geosíntesis (reacción que integra químicamente los minerales) que involucra sílico-alúminatos naturales. (HERMANN et al., 1999).

Xu y Van (2000, p. 247), afirman "cualquier compuesto puzolánico o fuente de sílice y alúmina, que es fácilmente disuelto en la solución alcalina, actúa como fuente precursora de geopolímeros y por lo tanto se presta al proceso de geopolimerización". Los átomos de silicio y aluminio reaccionan para formar moléculas que son química y estructuralmente comparables a las que construyen rocas naturales. (HERMANN et al., 1999).

En los últimos años la geopolimerización se ha convertido en una técnica alternativa o complementaria de los sistemas ligantes comunes que utilizan cemento portland o cal (MARQUES; LABRINCHA; SEABRA, 2013).

Para Davidovits (1991): "Los materiales consolidados tienen microestructura porosa del tipo de las zeolitas, pero carácter acentuadamente amorfo". Su naturaleza química le confiere, en relación a los productos de cemento, superior estabilidad en medio ácido o neutro (DUXSON et al., 2007). Por eso, han surgido aplicaciones innovadoras sostenidas en su superior durabilidad que traen consigo grandes ventajas de interés en el capo de la geotecnia.

2.1.1 Mecanismos de geopolimerización

Según Mozumder y Laskar (2015, p. 291): "La geopolimerización implica la reacción de poli-condensación de los precursores geopoliméricos, es decir, óxido de alumino-silicato con polisilicatos alcalinos que producen un enlace polimérico Si-O-Al como se muestra a continuación"

$$\mathrm{Mn}[-(-\mathrm{SiO_2})_z - \mathrm{AlO_2}]_n . w\mathrm{H_2}O \qquad (1)$$

Dónde; M es el elemento alcalino, z es 1, 2 o 3, n es el grado de polimerización y w es el grado de hidratación.

De acuerdo con Fernández; Palomo y Criado, (2005): Los mecanismos de reacción alcalina se dividen en las siguientes etapas:

a. Destrucción – Coagulación

Este primer proceso de desagregación puede ser descrito como la ruptura de las conexiones Me-O, Si-O-Si, Al-O-Al, y Al-O-Si de la materia prima. Esta etapa de desagregación de la fase sólida es gestionada por la ruptura de las conexiones covalentes Si-O-Si y Al-O-Al, la cual requiere un proceso reactivo, como por ejemplo la formación de complejos hidratados. Para tal éxito basta, por ejemplo, variar la fuerza iónica del medio, al añadir iones con propiedades dadoras, tales como los metales alcalinos, provocando la variación del pH del medio. La ruptura de las conexiones Si - O - Si en medio alcalino ocurre de la siguiente forma:

$$\equiv Si - O - Si \equiv + OH^- \Rightarrow \equiv Si - \underset{\cdot OH}{O} - Si \equiv \Rightarrow \equiv Si - OH + {}^-O - Si \equiv \qquad (2)$$

El resultado es una redistribución de la densidad electrónica sobre los átomos de silicio, haciendo más fácil la ruptura de la conexión Si-O-Si.

Los grupos hidroxilos afectan de la misma manera las conexiones Al-O-Si, de tal forma que los aluminatos en disolución alcalina forman complejos del tipo $[Al(OH)_4]^-$, $[Al(OH)_5]^{2-}$ o

[Al (OH) 5] OH) $_6]^{3-}$, dependiendo del pH del medio. De esta manera se crean condiciones apropiadas para el transporte de las unidades estructurales reactivas y para el desarrollo de la estructura coagulada.

b. Coagulación - Condensación

La acumulación de los productos desagregados origina mayor contacto entre los mismos, formándose una estructura coagulada que favorece los procesos de policondensación.

Para pH superior a 7, la desagregación de las conexiones Si-O-Si da lugar a complejos hidroxilados Si $(OH)_4$ como componentes más estables, los cuales van a condensar formando nuevas conexiones Si-O-Si.

Todos los procesos, así como la composición y estabilidad de los productos formados en esta etapa, se ven afectados principalmente por la concentración de álcalis en el medio. A partir de cierto momento, el desarrollo de la resistencia mecánica del material es acompañado por el descenso del pH de la fase líquida. Esto es posible debido a la absorción e interacción de las especies alcalinas con los hidrosilicatos y los hidroaluminosililatos que se formaron, seguido de la aparición de hidrosilicatos del tipo zeolítico.

La cantidad de conexiones alcalinas formadas dependerá de la cantidad de álcalis en la fase inicial, la temperatura y la duración del proceso de endurecimiento.

c. Condensación - Cristalización

La presencia de partículas de la fase sólida inicial es igual a la aparición de micropartículas resultantes de la estructura condensada durante la precipitación de los productos, cuya composición está determinada por la composición mineralógica y química de la fase inicial de la naturaleza del componente alcalino y de las condiciones de endurecimiento.

2.1.2 Metacaolín

Para Lisboa et al. (2014): "uno de los principales precursores del geopolímero es el metacaolín. Este es una forma ultrafina de polvo claro de aluminio derivado de la calcinación de la arcilla caulinítica". La calcinación es un término que se refiere al calentamiento controlado a una temperatura específica, para obtener un material amorfo, siendo el metacaulina normalmente producido a temperaturas entre 600 y 900ºC. (SAID et al., 2011).

El proceso de calcinación del caolín implica la siguiente reacción:

$$Al_2SiO_5(OH_4) \xrightarrow{600-900°C} Al_2O_3.2SiO_2 + 2H_2O \quad (3)$$

Siddique y Klaus (2009), mencionan las ventajas de la utilización del metacaolín como matriz de los geopolímeros:

- Alta resistencia a la compresión y flexión;
- Resistencia a agentes químicos;
- Elevada durabilidad;
- Reducción de los efectos expansivos causados por las reacciones álcalis-sílice (ASR);
- Elevada compacidad del hormigón, adecuada trabajabilidad y acabado;
- Reducción de la incidencia de eflorescencias (sales solubles).

El metacaolin es una buena alternativa en ligantes con cal o cemento Portland, pues necesita menos energía en su producción. En la adopción de prácticas de construcción sostenible, el contenido energético incorporado es un factor relevante. (MASSENA, 2011).

2.1.3 Activadores, orden de mezcla y cura

De acuerdo a Khale y Chaudhary (2007): "El componente alcalino como activador, es un compuesto del elemento del primer grupo en la tabla periódica, dicho material también se denomina aglomerante de aluminosilicato activado alcalino o material cementoso activado alcalino".

Para Rovnaník (2010. p.1176), la activación alcalina se puede realizar mediante una solución de hidróxido alcalino. Los activadores más utilizados en la obtención de estructuras geopoliméricas son los hidróxidos de sodio o potasio, carbonato de sodio, silicatos de sodio o

potasio y sobre todo, mezclas de estos compuestos.

Para Marques, Labrincha y Seabra (2013), el tipo de dosificación y concentración del activador tiene que ser estudiado en función del material de partida, pues la composición química y granulometría condicionan la reacción de activación.

En su mayoría los activadores se preparan químicamente, ya que no se encuentran en la naturaleza. Los activadores son principalmente de dos tipos: simples y compuestos. Los primeros están constituidos por una solución alcalina única (hidróxido de sodio o de potasio); los compuestos se forman por la asociación de una solución alcalina con silicato de sodio o de potasio.

Para Palomo, Grutzeck y Blanco (1999): "El orden de mezcla de los reactivos puede afectar significativamente al desarrollo de fases del producto final. Idealmente, sería interesante en una primera fase mezclar y dejar madurar los componentes solubles y sólo después, en una fase posterior, añadir los componentes insolubles".

Según Pinto (2004): "los materiales obtenidos por geopolimerización o activación alcalina son sensibles a las condiciones de curación. Debe intentar minimizarse la retracción, asociada a la pérdida de agua por secado".

El tiempo de cura y la ganancia de resistencia mecánica pueden acelerarse con la temperatura, alcanzando resistencia mecánica superior, aunque aumenta la retracción. (MARQUES; LABRINCHA; SEABRA, 2013).

3 BIOCEMENTACIÓN

3.1 Aspectos generales

La biocementación según lo definido por Ivanov y Chu (2008), es un proceso que se encarga de unir partículas del suelo junto con minerales y otras sustancias para mejorar las propiedades de resistencia, rigidez a través de productos químicos o actividad microbiana.

Estudios sobre biocementación iniciaron en 2001 en Australia (KUCHARSKI et al., 2006). A través de la producción de materiales por medios microbianos. Esta técnica se utiliza principalmente en aplicaciones de ingeniería geotécnica, para fortalecer y mejorar las características de los suelos (FERRIS et al., 1997; NEMATI y VOORDOUW, 2003; WHIFFIN et al., 2007).

3.2 Procesos químicos y microbiológicos

La cementación química (o lechada química) se refiere al llenado de los vacíos con productos químicos. Este método es ampliamente utilizado en ingeniería geotécnica (INDRARATNA y CHU, 2015). Entre los productos utilizados para unir las partículas del suelo se incluyen silicato de sodio, cloruro de calcio, hidróxido de calcio (cal), cemento, acrilatos, acrilamidas, poliuretanos (KAROL, 2003).

La cementación química del suelo en la naturaleza se debe por lo general, a los microorganismos asociados a menudo con los sedimentos cementados que contienen; calcio, hierro, manganeso y aluminio, cristalizándose como carbonatos, silicatos, fosfatos, sulfuros e hidróxidos, especialmente hidróxidos de hierro (DEJONG et al., 2006). Estos, dependiendo de su cristalización, también pueden ser un importante agente de cementación en los suelos (DUIKER et al., 2003). El secado de muestras de suelo que contienen hidróxido de hierro puede producir un endurecimiento y cementación irreversible. En áreas de suelo con alto pH o potencial redox, el hidróxido de hierro se precipita formando nódulos cementados (JOHNSO y CROWDER 1991; WEISS et al., 2005).

Ivanov y Chu (2008), concuerdan que para formar hidratos férricos por oxidación e hidrólisis de Fe (II), el hierro (III) debe reducirse de manera preliminar mediante bacterias reductoras de hierro. La oxidación de los iones ferrosos y los quelatos en el suelo se realiza químicamente o es catalizada por bacterias oxidantes de hierro neutrófilas o acidófilas.

Un ejemplo bien conocido de cementación natural es la precipitación de dióxido de sílice, que rellena los poros y une las partículas del

©ABMS, 2019

suelo. También se conoce como calcificación natural, debido a la deposición de carbonato de calcio a partir del flujo ascendente del agua subterránea, la evapotranspiración o la formación de carbonato de calcio en zonas de alcalinidad elevada formada por descomposición microbiana de la materia orgánica (MOZLEY y DAVIS, 2005).

Kucharski et al. (2006), menciona que los materiales, tratados por biocementación, pueden ser conglomerados, brechas, areniscas, limolitas, esquistos, calizas, yeso, turba, lignito, arena, tierra, arcilla, sedimentos y aserrín y los microorganismos asociados son de los géneros Bacillus, Sporosarcina, Sporolactobacillus, Clostridium y Desulfotomaculum. En el Cuadro 1 se observan los posibles procesos microbianos que pueden conducir potencialmente a la biocementación.

3.3 Aplicaciones

Algunas pruebas de laboratorio sobre refuerzo de diques con biocementación se llevaron a cabo en los Países Bajos, donde se ha introducido biomasa de bacterias aeróbicas en el suelo, para lograr la cementación debido a la producción de carbonato de calcio mediada por bacterias que conectan los granos de arena con la formación de arenisca. (IVANOV y CHU, 2008).

De manera similar, se formó una matriz de suelo cementado dentro de una arena colapsable inicialmente suelta, utilizando la precipitación de calcita inducida por microbios debido a la modificación de la biomasa de las bacterias aeróbicas *Bacillus pasteurii* y un medio de crecimiento líquido con urea y una sal de calcio disuelta. La arena cementada, muestra un comportamiento con una mayor rigidez de corte inicial y una capacidad de corte máxima que las muestras sueltas no tratadas.

De acuerdo a Kucharski et al. (2005), la técnica de la biocementación podría desenvolverse en las siguientes aplicaciones de ingeniería:

- Mejorar de la estabilidad para muros de contención, terraplenes, y presas;
- Refuerzo o estabilización del suelo para facilitar la estabilidad de túneles o construcciones subterráneas.
- Incremento de la capacidad de carga de cimientos;
- Reducción del potencial de licuefacción del suelo;
- Tratamiento de la superficie del pavimento;
- Fortalecimiento de las presas para evitar la erosión y falla de taludes;
- Control de la erosión en zonas costeras y ríos;

Las tecnologías para la lechada microbiana podrían ser similares a las utilizadas en la lechada química. La profundidad de penetración depende del tamaño de los microorganismos utilizados. El tamaño típico de las bacterias unicelulares es de 1 a 3 µm, pero la longitud de los filamentos celulares microbianos puede ser de hasta 100 µm, lo que puede ser un obstáculo en la penetración de microorganismos filamentosos en el suelo. La especificidad de la lechada microbiana es que deben proporcionarse condiciones óptimas como pH, salinidad, potencial de reducción de la oxidación, concentraciones de nutrientes y contenido de agua.

Una ventaja de la lechada microbiana sobre la química es que las primeras pueden ser no tóxicas, Mientras que muchas lechadas químicas, especialmente las basadas en acrilamidas, lignosulfonatos y poliuretano son tóxicas y dañinas para el medio ambiente.

Cuadro 1. Posibles procesos microbianos que pueden conducir potencialmente a la biocementación.

Grupo fisiológico de microorganismos.	Mecanismo de biocementación.	Condiciones esenciales para la biocementación.	Posibles aplicaciones geotécnicas.
Bacterias reductoras de sulfato.	Producción de sulfuros de metales no disueltos.	Condiciones anaerobias; presencia de sulfato y fuente de carbono en el suelo.	Mejorar la estabilidad para taludes y presas
Bacterias amonificantes	Formación de carbonatos de metales no disueltos en el suelo debido al aumento de pH y liberación de C02	Presencia de urea y sal metálica disuelta.	Mitigar el potencial de licuefacción de la arena; Mejorar la estabilidad para muros de contención, terraplenes y presas; Aumentar la capacidad portante de los cimientos.
Bacterias reductoras de hierro	Producción de solución ferrosa y precipitación de sales e hidróxidos ferrosos y férricos no disueltos en el suelo.	Las condiciones anaeróbicas cambiaron por condiciones aeróbicas; presencia de minerales férricos	Densidad del suelo en terrenos reclamados y evitar la avalancha de suelo Reducir el potencial de licuefacción del suelo

Fuente: Ivanov y Chu (2008).

4 BIOCLOGGING

4.1 Aspectos generales

Ivanov y Chu (2008) definieron el término bioclogging como el proceso para reducir la conductividad hidráulica del suelo y las rocas porosas debido a la actividad o los productos microbianos, Las bacterias más utilizadas para el bioclogging incluyen *Clostridium*, *Eubacterium*, *Peptococcus*, *Streptococcus y Lactobacillus* (Bezuijen et al. 2007).

Esta técnica podría usarse para reducir la erosión de los canales de drenaje, formar cortinas de lechada para reducir la migración de cationes pesados contaminantes orgánicos, y evitar la canalización de diques y presase en tierra. El resultado de disolver la alta concentración de materia orgánica en el agua y pasarla a través de la matriz del suelo indica la obstrucción microbiana para bloquear los espacios de la textura del suelo (Mitchell y Nevo, 1964; Taylor y Jaffe, 1990).

La ubicación precisa del lugar a obstruir es importante para la inyección de nutrientes. La composición de estos permite que los microorganismos presentes en el suelo o estructura fermenten y crezcan. Los ácidos orgánicos formados durante la fermentación de la energía son a su vez digeridos por otras bacterias. El sellado de rellenos sanitarios, la reducción de la erosión de los canales de drenaje, la reducción de los movimientos de contaminantes y el control de la erosión de presas y diques pueden ser aplicaciones útiles de bioclogging (Ivanov y Chu, 2008).

Biopolímeros formadores de gel insolubles en agua producidos industrialmente de origen microbiano, como: xantan, quitosán, ácido poliglutámico, alginato de sodio y polihidroxibutirato, también se pueden usar como lechadas para el control erosión, encerramiento de la zona de biorremediación y mitigación de la licuefacción del suelo (Momeni et al. 1999; Yang et al. 1993).

4.2 Productos y procesos microbianos.

Autores como Baveye et al., (1998); Bonala y Reddi (1998), han observado que la acumulación de biomasa bacteriana, limo bacteriano insoluble y burbujas de gas biogénico poco solubles permiten que el suelo sea más impermeable.

Uno de los procesos de bioclogging es la producción microbiana de polisacáridos insolubles en agua. Esto puede realizarse mediante la adición de una fuente de carbono y un cultivo enriquecido o puro de microorganismos al suelo.

©ABMS, 2019

Una adición de microorganismos debe ir acompañada de un medio que inicie el bioclogging. Sin embargo, este proceso podría complicarse por el transporte de células microbianas al suelo, que depende del tamaño de la célula, las propiedades de la superficie y el estado fisiológico de la célula (Murphy y Ginn 2000).

Los grupos de microorganismos que producen polisacáridos extracelulares insolubles para unir las partículas del suelo y rellenar los poros del suelo son bacterias oligotróficas del género Caulobacter (RAVENSCROFT et al., 1991; TSANG et al., 2006), bacterias aerobias gramnegativas de los géneros *Acinetobacter, Agrobacterium, Alcaligenes, Arcobacter, Cytophaga, Flavobacterium, Pseudomonas y Rhizobium* (PORTILHO et al., 2006; ROSS et al., 2001).

Después del crecimiento de estas bacterias en el suelo, su permeabilidad para el agua se reducirá en gran medida. Este enfoque podría ser utilizado para diferentes aplicaciones geotécnicas, como la biorremediación zonal selectiva, el control de puertos y presas, la minimización del potencial de erosión, la mitigación de la licuefacción, la construcción de barreras reactivas y la estabilización a largo plazo de suelos contaminados (Yang et al. 1993). En el Cuadro 2 se resumen diferentes procesos microbianos que pueden conducir potencialmente al bioclogging.

Se han llevado a cabo pruebas de laboratorio para identificar los grupos microbianos que podrían usarse para bioclogging. Estos estudios han demostrado, que los cultivos de enriquecimiento de bacterias nitrificantes y oligotróficas se pueden usar para bioclogging, produciendo polisacáridos microbianos a partir de una solución de amonio y CO_2 de aire.

Una de las desventajas del bioclogging y la biocementacion del suelo en comparación con la inyección química es que el proceso microbiano suele ser más lento. Otra desventaja es que el proceso microbiano es más complejo que el químico porque la actividad microbiana depende de muchos factores ambientales como la temperatura, el pH, las concentraciones de donantes y aceptores de electrones, tasas de difusión de nutrientes y metabolitos.

El diseño de aplicaciones microbianas en bioclogging y biocementacion debe tener en cuenta no solo las condiciones del suelo y el contenido de medio de lechada, sino también los aspectos microbiológicos, ecológicos y de ingeniería geotécnica. El diseño de bioclogging y biocementacion requiere datos de los procesos biológicos (crecimiento, biosíntesis, biodegradación, bioreducción, biooxidación y actividades enzimáticas específicas), reacciones químicas acompañadas de la formación de compuestos insolubles y procesos fisicoquímicos como la precipitación, la cristalización y la adhesión. Los parámetros geotécnicos específicos del suelo deben usarse como criterios de optimización del proceso. (IVANOV y CHU, 2008).

Cuadro 2. Procesos microbianos que pueden conducir potencialmente a bioclogging. Después de Ivanov y Chu (2008).

Grupo fisiológico de microorganismos.	Mecanismo de bioclogging.	Condiciones esenciales para bioclogging.	Posibles aplicaciones geotécnicas.
Algas y cianobacterias.	Formación de capa impermeable de biomasa.	Penetración lumínica y presencia de nutrientes.	Reducción de la infiltración de agua en pendientes y control de filtraciones.
Bacterias aerotrópicas y facultativas anaerobias productoras de limo heterótrofas	Producción de limo en suelo.	Presencia de oxígeno y medio con relación C: N> 20.	Cobertura evitable para el control de la erosión del suelo y protección de taludes.
Bacterias microaerofílicas oligotróficas.	Producción de limo en suelo.	Baja concentración de oxígeno y medio con baja	Reducir la erosión del canal de drenaje y controlar la filtración.

		concentración de fuentes de carbono.	
Bacterias nitrificantes	Producción de limo en suelo.	Presencia de amonio y oxígeno en el suelo.	Reducir la erosión de canales de drenaje.
Bacterias reductoras de sulfato.	Producción de sulfuros de metales no disueltos.	Condiciones anaeróbicas: presencia de sulfato y fuente de carbono en el suelo.	Forma cortinas de lechada para reducir la migración de metales pesados y contaminantes orgánicos.
Bacterias amonificantes	Formación de carbonatos de metales no disueltos en el suelo debido al aumento del pH y la liberación de CO.	Presencia de urea y sal metálica disuelta.	Evita la canalización de diques y presas en tierra.
Bacterias reductoras de hierro	Producción de solución ferrosa y precipitación de sales e hidróxidos ferrosos y férricos no disueltos en el suelo.	Condiciones anaeróbicas cambiadas a condiciones aeróbicas; presencia de minerales férricos	Evita la canalización de diques y presas en tierra.

5 CONCLUSIONES

La geopolimerización es una técnica basada en la estabilización por medio de aluminosilicatos que provocan una reacción rápida con gran potencial en el mejoramiento de la resistencia mecánica de suelos. De esta manera esta tecnología se constituye en una solución viable a la reutilización y reciclaje de desechos sólidos industriales y subproductos, de los cuales, han surgido aplicaciones innovadoras sostenidas en la superior durabilidad, lo que genera un desarrollo sostenible y rentable en la ingeniería geotécnica. La biocementación y el bioclogging pueden utilizarse en ingeniería geotécnica para mejorar las propiedades mecánicas del suelo in situ. Estos métodos pueden reemplazar los métodos de compactación mecánica que requieren más energía o los métodos de inyección química costosos y poco amigables para el medio ambiente. Sin embargo, para adoptar el método microbiano de manera efectiva, se requiere una integración de los estudios de ingeniería, microbiológicos y ecológicos y la consideración del diseño.

Los microorganismos más adecuados para el bioclogging o la biocementación en la construcción a gran escala son las bacterias aeróbicas y microaerofílicas.

Es fundamental el estudio profundo de las características del suelo específico a tratar, ya que estos son diversos y su composición es muy variable, lo cual puede provocar diferentes reacciones frente a cualquier técnica de mejoramiento aplicada, reflejándose en la variabilidad de los resultados obtenidos y esperados en el mejoramiento de la resistencia mecánica de los suelos.

REFERÊNCIAS

Chu, J. et al. (2014). Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand. *Acta Geotechnica*, v. 9, n. 2, p. 277-285.

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and calorimetry*, v. 37, n. 8, p. 1633-1656.

Marqués, J.; Labrincha, J. A.; SEABRA, M. (2013). Geopolimerização de cinzas e dregs da indústria de pasta de papel. Tese de Doutorado. Dissertação M. Sc., Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

Hermann, E.; Kunze C.; Gatzweiler R.; Kiebig G.; Davitovits J. (1999). In: Proceedings of Geopolymers, p 211.

Xu, H.; Van D. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. International journal of mineral processing, v. 59, n. 3, p. 247-266.

Duxson, P. et al. (2007). Geopolymer technology: the current state of the art. Journal of materials science, v. 42, n. 9, p. 2917-2933.

Mozumder, R. A.; LASKAR, A. I. (2015) Prediction of unconfined compressive strength of geopolymer stabilized clayey soil using artificial neural network. *Computers and Geotechnics*, v. 69, p. 291-300.

Fernández J. A.; Palomo, A.; Criado, M. (2005)

Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: a descriptive model. *Cement and concrete research*, v. 35, n. 6, p. 1204-1209.

Lisboa D. C., D. et al. (2014). Influence of Curing Temperature on Metakaolin-Based Geopolymers. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications, p. 210-215.

Said, M., Mohamed et al. (2011) Influence of calcined kaolin on mortar properties. *Construction and building Materials*, v. 25, n. 5, p. 2275-2282.

Siddique, R.; Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science*, v. 43, n. 3-4, p. 392-400.

Massena, R. M. (2011). Avaliação da evolução das características de argamassas de cal aérea com diferentes teores de metacaulino em exposição natural. Tese de Doutorado. Facultad de Ciencias e Tecnología.

Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and building materials*, v. 24, n. 7, p. 1176-1183.

Palomo, A.; Grutzeck, M. W.; Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and concrete research*, v. 29, n. 8, p. 1323-1329.

Pinto, A. Teixeira. (2004). Sistemas ligantes obtidos por activação alcalina do metacaulino. Tese de Doutorado.

Khale, D.; Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review. *Journal of materials science*, v. 42, n. 3, p. 729-746.

Kucharski E.; Cord-Ruwisch R, Whiffin V, Al-Thawadi SMJ. (2006). Microbial biocementation. World Patent; 066326.

Chu, J. et al. (2014). Optimization of calcium-based bioclogging and biocementation of sand. *Acta Geotechnica*, v. 9, n. 2, p. 277-285.

Ferris, F. G. et al. (1997) Bacteriogenic mineral plugging. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, v. 35, n. 08.

Nemati, M.; Voordouw, G. (2003). Modification of porous media permeability, using calcium carbonate produced enzymatically in situ. *Enzyme and Microbial Technology*, v. 33, n. 5, p. 635-642.

Whiffin, V. S.; Van P.; Leon A.; Harkes, M. P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Geomicrobiology Journal*, v. 24, n. 5, p. 417-423.

Karol, R. H. (2003). Chemical grouting and soil stabilization, revised and expanded. Crc Press.

Bezuijen, A. et al. (2007). Laboratory tests on compensation grouting, the influence of grout bleeding. In: *Proc., 33rd ITA-AITES World Tunnel Congress*. New York: Taylor & Francis, p. 395-401.

Dejong, J. T.; Fritzges, M. B.; Nüsslein, Klaus. (2006). Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 132, n. 11, p. 1381-1392.

Johnson-Green, P. C.; Crowder, A. A. (1991). Iron oxide deposition on axenic and non-axenic roots of rice seedlings (Oryza sativa L.). *Journal of plant nutrition*, v. 14, n. 4, p. 375-386.

Weiss, J. V.; Emerson, D.; Megonigal, J. Patrick. (2005). Rhizosphere iron (III) deposition and reduction in a Juncus effusus L.-dominated wetland. *soil science society of america journal*, v. 69, n. 6, p. 1861-1870.

Ivanov, V.; Chu, J. (2008). Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, v. 7, n. 2, p. 139-153.

Mozley, P. S.; Davis, J. M. (2005). Internal structure and mode of growth of elongate calcite concretions: Evidence for small-scale, microbially induced, chemical heterogeneity in groundwater. *Geological Society of America Bulletin*, v. 117, n. 11-12, p. 1400-1412.

Kucharski, E.; Winchester, W., Leeming W.; Cord-Ruwisch, R.; Muir C.; Banjup, W., Whiffin V.; Thawadi, S.; Mutlaq, J. (2005). Microbial biocementation. Patent Application WO/2006/066326; International Application No.PCT/ AU2005/001927.

Indraratna, B.; Chu, J.; (2015). Ground Improvement Case Histories: Chemical, Electrokinetic, Thermal and Bioengineering. Butterworth-Heinemann.

Bonala, M. V. S; Reddi, L. N. (1998). Filtration and drainage in geotechnical/geoenvironmental engineering. Geotechnical special publication No. 78.

Baveye, P. et al. (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Critical reviews in environmental science and technology*, v. 28, n. 2, p. 123-191.

Portilho, M. et al. (2006). Production of insoluble exopolysaccharide of Agrobacterium sp. (ATCC 31749 and IFO 13140). In: *Twenty-Seventh Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Humana Press. p. 864-869.

Murphy, E. M.; Ginn, T. R. (2000). Modeling microbial processes in porous media. *Hydrogeology Journal*, v. 8, n. 1, p. 142-158.

Ravenscroft, N. et al. (1991). Identification, isolation, and structural studies of extracellular polysaccharides produced by Caulobacter crescentus. *Journal of bacteriology*, v. 173, n. 18, p. 5677-5684.

Tsang, P. H. et al. (2006). Adhesion of single bacterial cells in the micronewton range. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 103, n. 15, p. 5764-5768.

Ross, N. et al. (2001) Clogging of a limestone fracture by stimulating groundwater microbes. *Water Research*, v.

35, n. 8, p. 2029-2037.

Yang, I.C.; Li Y.; Park, J.K.; Yen T.F.; (1993). Subsurface application of slime—forming bacteria in soil matrices. In: Proceedings of the 2nd international symposium in situ and on site bioreclamation, San Diego, CA, Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Taylor, S. W.; Jaffé, P. R. (1990). Biofilm growth and the related changes in the physical properties of a porous medium: 1. Experimental investigation. *Water resources research*, v. 26, n. 9, p. 2153-2159.

Mitchell, R.; Nevo, Z. (1964). Effect of bacterial polysaccharide accumulation on infiltration of water through sand. *Appl. Environ. Microbiol***.**, v. 12, n. 3, p. 219-223.

Momeni, D. et al. (1999). Potential use of biopolymer grouts for liquefaction mitigation. *Phytoremediation and Innovative Strategies for Specialized Remedial Applications*, v. 5, n. 6, p. 175-180.

Duiker, S. W. et al. (2003). Iron (hydr) oxide crystallinity effects on soil aggregation. *Soil Science Society of America Journal*, v. 67, n. 2, p. 606-611.