

MITIGACIÓN DEL CRACKING EN SUELOS BLANDOS Y PROBLEMÁTICOS



**Universidad
de Cartagena**

Fundada en 1827

YOEL DE JESUS LOBELO CHAVEZ

ANGEL DAVID RAMIREZ BETIN

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.

2022



MITIGACIÓN DEL CRACKING EN SUELOS BLANDOS Y PROBLEMATICOS

Autores:

YOEL DE JESUS LOBELO CHAVEZ

ANGEL DAVID RAMIREZ BETIN

MONOGRAFÍA PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIEROS CIVILES

Director:

ING. JAIR ARRIETA BALDOVINO

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOTECNIA, MATERIALES, VÍAS Y TRÁNSITO
(GEOMAVIT)**

Línea de investigación:

Geotecnia

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS, D. T. Y C.

2022



UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
MITIGACION DEL CRACKING EN SUELOS BLANDOS Y PROBLEMATICOS

NOTA DE ACEPTACION

Felicitades!
Excelente desempeño durante
el desarrollo de la
tesis de grado.

Firma del director
JAIR ARRIETA BALDOVINO

Firma del jurado
GUILLIAM BARBOZA MIRANDA

Firma del jurado
MODESTO BARRIOS FONTALVO

**TABLA DE CONTENIDO**

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
ANÁLISIS BIBLIOMETRICO DE LA MONOGRAFIA	11
Número de artículos publicados	12
Número de artículos publicados según el tipo de cita	13
Número de artículos publicados por temática	14
Análisis de co-citacion de palabras clave	15
INTRODUCCIÓN	16
OBJETIVOS	18
1. VARIABLES Y PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN EL AGRIETAMIENTO	20
1.1. PROPIEDADES INTRÍNSECAS DEL SUELO	20
1.1.1. Contenido de humedad.....	20
1.1.2. Estructura interfacial	21
1.1.3. Densidad seca.....	22
1.1.4. Mineralogía y contenido de arcilla.....	22
1.2. PROPIEDADES EXTERNAS	24
1.2.1. Temperatura	24
1.2.2. Ciclos de humectación-secado	24
1.3. DIFERENCIA ENTRE CONTRACCIÓN Y FISURAMIENTO EN LOS SUELOS	25
2. PROCESO DE FISURAMIENTO DE SUELOS VULNERABLES	26
2.1. ANÁLISIS CUANTITATIVO	26
2.2. ANÁLISIS CUALITATIVO	32
2.3. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL FISURAMIENTO	38
2.4. MÉTODOS DE MODELAMIENTO DEL FISURAMIENTO	40
2.4.1. Sistema de procesamiento de imágenes de grietas (CIAS).....	44
2.4.2. Velocimetría de imágenes de partículas (PIV)	44
2.4.3. Método de correlación de imágenes digitales (DIC)	45
2.4.4. Método de elementos discretos	46



2.4.5. Método de elementos finitos	46
3. MÉTODOS DE MITIGACION DEL CRACKING MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ADITIVOS TRADICIONALES	46
3.1. ESTABILIZACIÓN CON CAL.....	47
3.2. ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS VOLANTES (FA)	58
3.3. ESTABILIZACIÓN CON POLÍMEROS (POLIURETANO, POLIETILENO, POLIPROPILENO, NYLON).....	61
3.3.1. Comportamiento de grietas por desecación en suelos arcillosos reforzados con fibras de polipropileno	65
3.4. ESTABILIZACIÓN CON OTROS RESIDUOS DE INDUSTRIAS	66
3.4.1. Efecto hidrofóbico en la estabilización de suelos para una mejora del suelo de la subrasante.....	70
4. CONCLUSIONES.....	72
5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	76



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Palabras claves utilizadas para la búsqueda de artículos en Scopus.	12
Tabla 2. Tabla resumen de los análisis cuantitativos y cualitativos de los diferentes estudios por autores.	36
Tabla 3. Métodos de medición del fisuramiento en distintos tipos de suelos.	38
Tabla 4. Métodos de modelamiento del fisuramiento en distintos tipos de suelos, parte 1.	40
Tabla 5. Métodos de modelamiento del fisuramiento en distintos tipos de suelos, parte 2.	42
Tabla 6. Resultados de observación visual de grietas (N: No presenta grietas; S: Presenta grietas).	50
Tabla 7. Combinación de mezclas de suelo con sus respectivas proporciones.	50
Tabla 8. Influencia de poliuretano mediante la aplicación de polímeros.	62
Tabla 9. Tabla resumen de los métodos de mitigación mediante la aplicación de aditivos tradicionales.	71



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Número de publicaciones anuales (2000-2022) en Scopus.	13
Figura 2. Numero de publicaciones anuales por tipo de cita.	13
Figura 3. Numero de publicaciones por temática.....	14
Figura 4. Gráfico de red de co-ocurrencia de palabras clave de autor.	15
Figura 5. Relación de grietas en la superficie (RSC) vs el contenido de humedad.	21
Figura 6. Grietas iniciales en la superficie del suelo.....	27
Figura 7. Formación de grietas secundaras perpendiculares a las grietas iniciales.	28
Figura 8. Procesamiento de imágenes.....	29
Figura 9. Velocidades de propagación de grietas.....	30
Figura 10. Variación de la tasa de evaporación con respecto al tiempo.	31
Figura 11. Ensayo de anillo restringido mediante la técnica de Bragg con fibra óptica.....	33
Figura 12. Curva de contenido de humedad vs tensión.	34
Figura 13. Ensayo de la maquina simuladora de grietas diagenetica.....	35
Figura 14. Gráfico de resistencia a la tracción vs succión aplicada en suelos tratados y no tratados.	48
Figura 15. Gráfico de variación de volumen vs succión aplicada en suelos tratados y no tratados.	49
Figura 16. Gráfico de variación de volumen vs succión aplicada en suelos tratados y no tratados.	52
Figura 17. Valores de CSIF y SIF para mezcla de suelo con porcentajes de hasta 10% de adición de escoria ultrafina, cal y cemento.	53
Figura 18. (a) Variación de factor de intensidad de contracción con el tiempo (b) Grietas finales por desecación de cada mezcla de suelo.	54
Figura 19. (a) Variación de factor de intensidad de contracción con el tiempo (b) Grietas finales por desecación de cada mezcla de suelo.	54
Figura 20. Gráfico de q vs contenido de TDA con 7 días de curado.	56
Figura 21. Gráfico de q vs contenido de TDA con 28 días de curado.	56



Figura 22. (a) Contenido de TDA-M vs potencial hinchamiento. (b) Contenido de TDA-C vs potencial de hinchamiento.....57

Figura 23. Limite liquido del suelo estabilizado con cenizas volantes vs Adiciones de cenizas volantes.....59

Figura 24. Índice plástico del suelo estabilizado con cenizas volantes vs Adiciones de cenizas volantes.....60

Figura 25. Potencial de hinchamiento vs Adiciones de FA.60

Figura 26. Sistema de clasificación unificado de suelos (Índice plástico vs Limite liquido).62

Figura 27. Deformación máxima por expansión de la muestra de suelo-polímero vs Tiempo. ...63

Figura 28. Tipos de falla en la muestra sin fibra de fibra (a) y muestra con 0.1% de fibra (b). ...64

Figura 29. Contenido de fibra de nylon vs Resistencia a la tracción.65

Figura 30. Influencia de la adición de agregados de hormigón reciclado (RCA), fibras de neumático reciclado (RTPFs) y fibras de vidrio (GFs) en las muestras a y b.....67

Figura 31. Influencia en la resistencia a la tracción mediante la adición de un 15% de RCA en una mezcla de suelo-fibra de vidrio, frente a la mezcla de suelo-fibra de residuos de neumático en las muestras a y b.68

Figura 32. Influencia de adición de residuos de mármol en un suelo colapsable de una región semiárida en el norte de Pakistán.69



RESUMEN

El cracking es un fenómeno de agrietamiento del suelo producido por su exposición a ciclos de humectación y secado, que causan cambios en el contenido de humedad del mismo. En la presente monografía, se planteó como objetivo estudiar las técnicas de mitigación del cracking, teniendo en cuenta que la literatura estudiada previamente indicó que las consecuencias del fenómeno se reflejaban en la inestabilidad y desplome de edificaciones, presas y estructuras en general. Para el desarrollo de la investigación, se llevó a cabo un análisis bibliométrico usando las palabras clave a cerca de la temática mediante la base de datos *Scopus*. Luego, se realizó un análisis de los artículos encontrados, referenciando aquellos que aportaran bases sólidas para el cumplimiento del objetivo de la investigación. De esta forma, se obtuvieron los resultados que permitieron establecer las conclusiones acerca de la temática de mitigación del cracking en suelos blandos.

La mayor parte de los artículos estudiados, coincidieron en que la forma más utilizada para el estudio de cracking en suelos a media y pequeña escala es la observación y tratamiento de imágenes digitales; no obstante, en otros estudios citados en la monografía, emplearon métodos estadísticos que permitieron la estimación de parámetros de agrietamiento, como el ancho de la grieta, número de nodos, y longitud y profundidad promedio de la grieta.

Se concluyó que la propiedad que rige la intensidad de agrietamiento en el suelo es su mineralogía, siendo la montmorillonita y la illita los minerales que representaban mayor potencial de hinchamiento para los suelos que constituían. A demás, con la información recopilada, se estableció que el método de mitigación que ofrece mayores resultados frente al fenómeno de cracking en suelos problemáticos es la estabilización química en dos fases: primero, la aplicación de un aditivo que produzca reacciones reductoras de variación volumétrica del suelo, y luego, un aditivo secundario, que optimice las propiedades mecánicas del mismo. Por último, se concluyó que la adición óptima de material estabilizador se encuentra en un rango del 10%-15%, en el que las propiedades del suelo aumentan hasta en un 200% y se disminuye en un 66% el potencial de hinchamiento.

Palabras claves: Cracking, intensidad de agrietamiento, suelos, estabilización química.



ABSTRACT

Cracking is a soil cracking phenomenon produced by its exposure to wetting and drying cycles, which cause changes in the moisture content of the soil. The objective of this monograph was to study cracking mitigation techniques, taking into account that the literature previously studied indicated that the consequences of this phenomenon were reflected in the instability and collapse of buildings, dams and structures in general. For the development of the research, a bibliometric analysis was carried out using the key words related to the topic through the Scopus database. Then, an analysis of the articles found was carried out, referencing those that provided solid bases for the fulfillment of the research objective. In this way, results were obtained that allowed establishing conclusions on the subject of cracking mitigation in soft soils.

Most of the articles studied agreed that the most commonly used method for the study of cracking in soils at medium and small scales is the observation and treatment of digital images; however, in other studies cited in the monograph, they used statistical methods that allowed the estimation of cracking parameters, such as crack width, number of nodes, and average length and depth of the crack.

It was concluded that the property that governs the intensity of cracking in the soil is its mineralogy, being montmorillonite and illite the minerals that represented the greatest swelling potential for the soils they constituted. In addition, with the information gathered, it was established that the mitigation method that offers the best results against the cracking phenomenon in problematic soils is chemical stabilization in two phases: first, the application of an additive that produces reductive reactions of volumetric variation of the soil, and then, a secondary additive that optimizes the mechanical properties of the soil. Finally, it was concluded that the optimum addition of stabilizing material is in the range of 10%-15%, in which soil properties are increased by up to 200% and the swelling potential is decreased by 66%.

Keywords: Cracking, cracking intensity, soils, chemical stabilization.



ANÁLISIS BIBLIOMETRICO DE LA MONOGRAFIA

La finalidad de este trabajo es el análisis, desde el punto de vista bibliométrico, de los diferentes artículos científicos existentes respecto a sus métodos estadísticos y matemáticos sobre mitigación del *cracking* en suelos. Fue realizado un análisis bibliométrico de la actividad científica acerca de la mitigación del *cracking* en suelos blandos y problemáticos, usando las palabras más importantes y relevantes acerca de esta temática con la ayuda de la base de datos *Scopus*. Posteriormente, se hizo una búsqueda específica con cada palabra en relación con el tema escogido utilizando el número de combinaciones necesarias de tal manera que se pueda obtener menos de 1000 documentos para el análisis bibliométrico. Se puede visualizar los documentos que ilustra la base de datos junto con los años específicos donde fue publicado dicho artículo, también se analizaron las gráficas que representan el número de documentos publicados por cada año. Finalmente, fueron extraídos todos los documentos encontrados en formato RIS (*Research Information Systems*).

Para el procesamiento de los metadatos descargados en extensión RIS, fue empleado el programa de *VOSviewer* (con licencia libre) para poder crear los mapas bibliométricos que indican las tendencias de las palabras sobre este tema y las relaciones que hay en los documentos de cada autor entre sí.

La búsqueda bibliométrica fue realizada desde el año 2000 hasta el 2022 ya que desde el año 2000 se empezó a incrementar de manera exponencial el número de artículos y documentos sobre la temática de la mitigación del *cracking* en suelos, por tanto, es conveniente analizar las cifras cuantitativas de los artículos durante ese intervalo de tiempo. La bibliometría es de utilidad para enumerar los documentos, informes y artículos que explican los diferentes métodos más eficaces para mitigar los daños producidos por el *cracking* o el agrietamiento natural de los suelos.

Los datos fueron analizados por la base de datos *Scopus*, desde el año 2000 al 2022 y posteriormente descargamos todos los documentos en formato RIS para crear los mapas bibliométricos en el programa de *VOSviewer*.

**Tabla 1.** Palabras claves utilizadas para la búsqueda de artículos en *Scopus*.

<i>String</i>	Número de documentos
((“soil”) AND (“cracking” OR “desiccation” OR “cracks”) AND (“mitigation” OR “stabilization”))	681
((“soil”) AND (“cracking” OR “desiccation”) AND (“mitigation” OR “stabilization”))	346
((“soil”) AND (“cracking”) AND (“mitigation” OR “stabilization”))	262
((“soil” OR “clay” OR “slit”) AND (“cracking”) AND (“mitigation”))	79
((“soil” OR “clay” OR “slit”) AND (“cracking”) AND (“mitigation” OR “stabilization”))	283
((“soil” OR “clay” OR “slit”) AND (“cracking”))	5.804
((“soil” AND “cracking”))	4.352

Fuente: Autores, (2022).

Se utilizó palabras claves referente a la temática escogida para tener más exactitud en la búsqueda de los documentos que vamos a necesitar posteriormente, la cual fueron; *soil, cracking, dessication, cracks, mitigation, stabilization*. La base de datos lanzo un total de 616 documentos, la cual es una cifra bastante aceptable ya que no sobrepasa los 1.000 archivos.

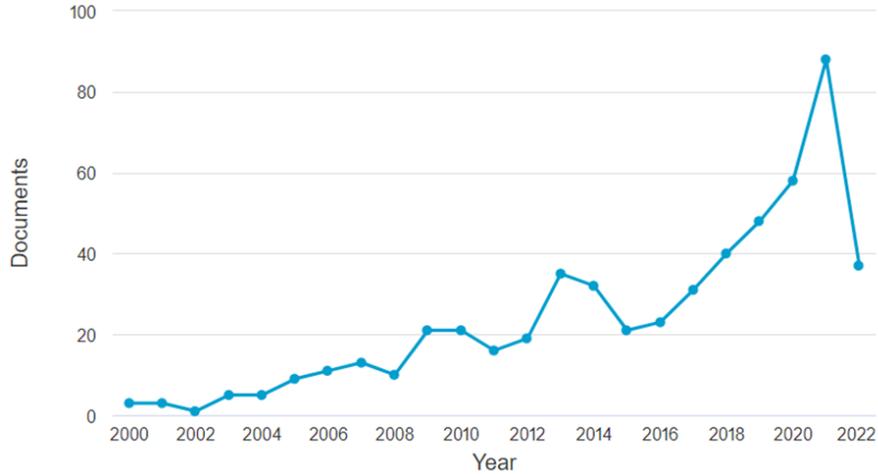
Los resultados obtenidos en cada indicador bibliométrico se presenten en los siguientes apartados:

Número de artículos publicados

Los artículos encontrados para los tópicos (*“soil”*) AND (*“cracking”* OR *“dessication”* OR *“cracks”*) AND (*“mitigation”* OR *“stabilization”*) fueron de un total de 616 documentos. Su distribución a lo largo de los años mostró los resultados desde el año 1971 hasta el 2022. Fue notado que, desde 1971 hasta el 2000 hubo una gran inestabilidad en el número de publicaciones por año, no se publicaban a gran escala ni superando los 20 artículos por año. Sin embargo, desde el 2001 hasta el 2006 hubo un aumento exponencial de artículos. Desde el 2010 empezó a aumentar las cifras de las publicaciones sobre el tema del *cracking* alcanzando su punto máximo en el año 2021 con un total de 88 documentos. Hasta la fecha, en el año 2022 van un total de 37 artículos publicados, estando a la espera si superará la cifra del 2021.



Figura 1. Número de publicaciones anuales (2000-2022) en Scopus.

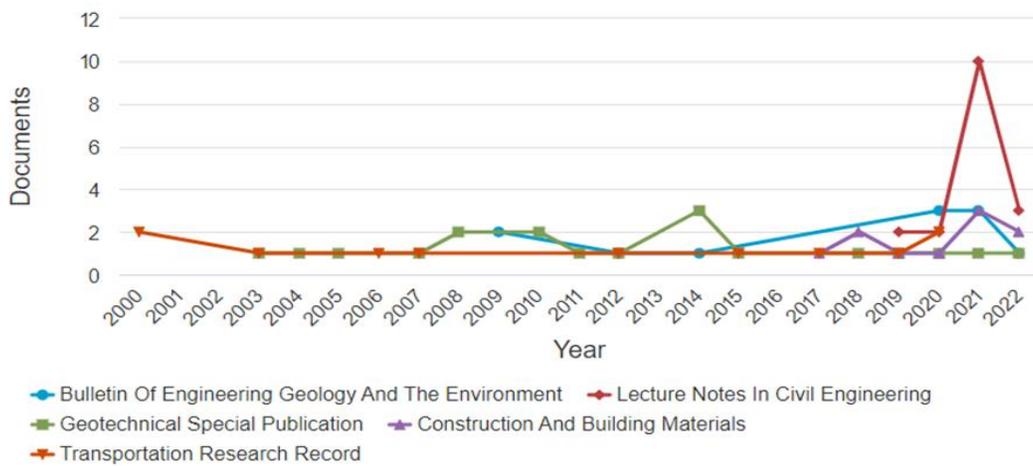


Fuente: Scopus.

En la Figura 1, se muestra el comportamiento anual de publicaciones de entre los años 2000 al 2022, ya que es el intervalo de años que más hubo crecimiento de artículos y la efectividad de información actualizada es más útil para nuestra monografía.

Número de artículos publicados según el tipo de cita

Figura 2. Numero de publicaciones anuales por tipo de cita.



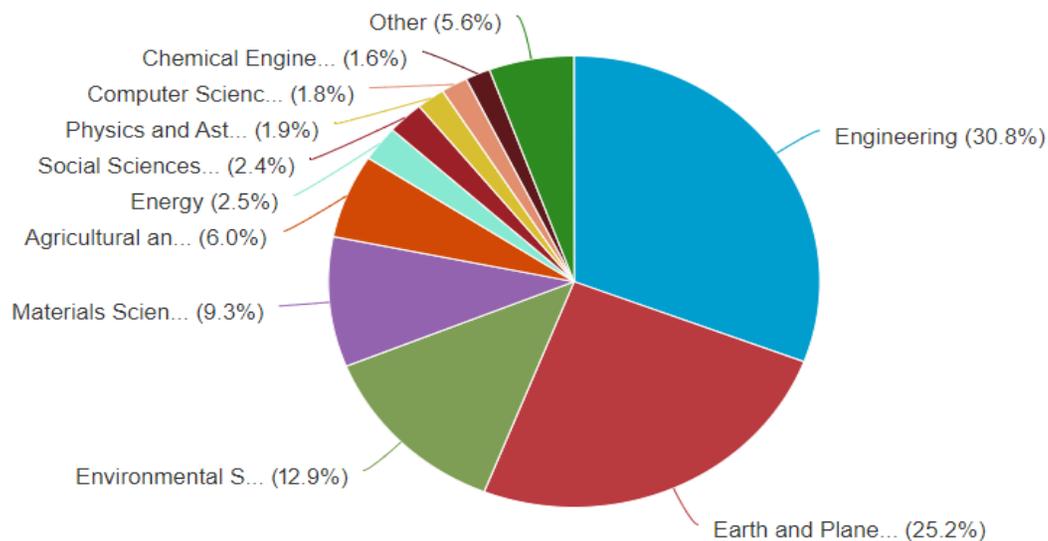
Fuente: Scopus.



Notamos que en la Figura 2, el mayor número de artículos fue de 10 en el 2021, la cual pertenece a las notas de clase de ingeniería civil; 3 artículos en el 2014 sobre publicaciones especiales de geotecnia; 3 artículos en el 2020 sobre boletines de ingeniería geológica y medio ambiente; 3 artículos en el 2021 sobre materiales de construcción entre otros.

Número de artículos publicados por temática

Figura 3. Numero de publicaciones por temática.



Fuente: Scopus.

La Figura 3, representa el porcentaje que tiene cada temática con referente a cada artículo que se publica, lo cual podemos concluir que el área de la ingeniería tiene más contenido citado con referente al tema del cracking con un 30.8%. Seguido está el área de la tierra y planos con un 25.2% y luego el área ambiental con un 12.9% de los artículos. Estos tres primeros serían las áreas más relevantes para investigar sobre el tema.



INTRODUCCIÓN

El agrietamiento por desecación es un fenómeno común causado por la pérdida de agua y la posterior contracción de los suelos cohesivos, este fenómeno natural está presente en muchos lugares y se vuelve más intenso en condiciones climáticas extremas, como la sequía, que pueden alterar significativamente la estructura del suelo, afectando sus propiedades hidráulicas y mecánicas, como lo sería reducir en gran medida la resistencia y la estabilidad del suelo, lo que puede conducir a la erosión del suelo o incluso a accidentes de ingeniería a nivel geotécnico, como deslizamientos de tierra, grietas en presas y fallas en los cimientos, lo que se traduce en importantes preocupaciones en diversos campos, como por ejemplo la geología, y la ingeniería (Zeng, H et al., 2021; Le, T et al., 2021).

En los últimos años, han ocurrido sequías graves y prolongadas en muchos países y regiones de todo el mundo, no siendo Colombia la excepción. Se prevé que las futuras sequías asociadas con olas de calor más intensas tendrán peores impactos. En condiciones de secado, la evaporación del agua del suelo provocará la aparición más frecuente de grietas y ondulaciones por desecación del suelo, alrededor de la superficie de la Tierra.

Un ejemplo de la situación anterior en Colombia sería la ciénaga de La Virgen, que es uno de los cuerpos de agua más importantes de la ciudad de Cartagena, pero al mismo tiempo, quizá, uno de los más olvidados. Este ecosistema está atravesando una verdadera emergencia ambiental a causa del verano y la desecación que esta época trae consigo, pues el nivel de agua en la ciénaga es muy bajo, llegando incluso a hallarse lugares donde en vez de agua se encuentra tierra firme. La situación más compleja fue reportada en un sector conocido como 'Boca del Parrao', donde no hay ningún flujo del preciado líquido, y la zona se redujo a un lodo seco rodeado del espeso manglar, lo que se ve reflejado en el suelo de la ciénaga como un sinnúmero de grietas. La causa más importante es la pérdida de las aguas lluvias (Caracol Cartagena, 2021).

Hasta la fecha, la mayoría de los estudios se centran en el agrietamiento del suelo de desecación provocado por la tensión capilar del agua intersticial entre las partículas del suelo y relacionan el agrietamiento con las condiciones topográficas y geomórficas regionales, así como con los cambios climáticos. Esos impactos resaltan la necesidad de investigar los mecanismos disponibles para



mitigar el agrietamiento por desecación del suelo sujeto a variaciones climáticas. Esto contribuirá a la prevención de desastres relacionados con el agrietamiento por desecación en ingeniería geológica, geotécnica y otros campos relevantes en respuesta a futuros cambios climáticos. Las variables climáticas juegan un papel de control en la formación y propagación de grietas de desecación en los suelos. Por ejemplo, Salimi et al. (2021a, 2021b) demostraron que las temperaturas elevadas disminuyen la resistencia a la tracción de los suelos no saturados durante el agrietamiento por desecación (Zeng, H et al., 2021).

Algunas regiones del mundo se han vuelto más áridas debido al cambio climático. La formación de grietas de desecación del suelo debido a la disminución de la humedad y la contracción volumétrica se observa con frecuencia en las regiones climáticas secas. La existencia de grietas en el suelo tiene efectos significativos en las propiedades de ingeniería del suelo arcilloso y puede ocasionar serios problemas en aspectos geotécnicos, geológicos y ambientales. El agrietamiento del suelo aumenta el tamaño de los macroporos del suelo y, por lo tanto, cambia la estructura interna del suelo y las propiedades hidráulicas al crear rutas de flujo preferenciales para la migración de humedad y contaminantes. El desarrollo de grietas en el suelo puede aumentar drásticamente la conductividad hidráulica y facilitar la infiltración de agua, lo que provocará fallas en las estructuras de contención de desechos. La infiltración de agua cambiará la presión intersticial en suelos no saturados, lo que afectará la resistencia al corte del suelo (Xu, J et al., 2021).

Además, las grietas pueden formar parte de una superficie de deslizamiento que no tiene resistencia al corte. Dado que los suelos arcillosos se utilizan ampliamente como capas impermeables para el relleno sanitario y el aislamiento de desechos cerca de la superficie del suelo, las grietas en el suelo pueden aumentar en gran medida la conductividad hidráulica, lo que puede causar fugas de contaminación y aumentar el riesgo de contaminación ambiental.

Así mismo, el agrietamiento del suelo aumenta la profundidad de meteorización de las pendientes arcillosas y la rugosidad de la superficie. Esto agrava la erosión del suelo en las superficies de las laderas y también reduce la cohesión del suelo, lo que lleva a la inestabilidad de las laderas. La aparición de grietas en el suelo puede degradar las propiedades físico-hidráulicas de las estructuras de la tierra, tales como diques, taludes y rellenos sanitarios, y puede provocar fallas catastróficas. Por ejemplo, hay miles de kilómetros de diques que se han agrietado en varios países, incluidos el



Reino Unido, los Países Bajos y los EE. UU en condiciones de sequía estacional. Anualmente, se deben gastar miles de millones de dólares en reparaciones de los diques agrietados para evitar mayores y subsecuentes daños. La comprensión de los mecanismos potenciales del agrietamiento del suelo es esencial en las evaluaciones de los daños potenciales a las infraestructuras (Xu, J et al., 2021). Referenciando casos puntuales, el fenómeno de agrietamiento ha afectado de manera significativa a las vías de la sabana de Bogotá, en donde se presentó una red de fisura y asentamientos en la estructura del pavimento, lo que equivale a una reducción del nivel de servicio y seguridad de tránsito (Pineda & Rueda, 2011); en la zona lacustre del valle de México, se presentan daños en las vialidades, servicios públicos y edificaciones (viviendas), a causa de la contracción volumétrica del suelo, que también se ve agravada por los sismos presentados durante la última década en este territorio (Sánchez & Auvinet, 2021); por último en el Sur de Moravia (República Checa), las consecuencias del cambio de temperatura en el entorno del suelo se vieron reflejadas en los asentamientos diferenciales (de hasta 150mm) en la estructura de un horno túnel de ladrillos, ya que se vio afectada la cimentación debido a grietas por desecación (Yilmaz et al., 2014)

A continuación, se presenta una monografía comparativa, en la que se realiza un análisis de la bibliografía existente acerca de los métodos de mitigación del cracking en suelos blandos y problemáticos. Para la recopilación y análisis de la información, se consultaron las bases de datos de la Universidad de Cartagena y en Google Académico, artículos científicos, artículos de revisión, tesis de pregrado y post grado disponibles que presentaran investigaciones detalladas acerca del tema en mención.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Profundizar e indagar en el conocimiento de las distintas investigaciones sobre las grietas en suelos arcillosos, con el fin de determinar los mejores métodos que puedan estabilizar y mitigar los efectos del agrietamiento en suelos blandos y problemáticos que se pueden presentar en el campo de la construcción para fines sociales, para que a futuro se puedan tomar medidas de



rehabilitación, mejoramiento, restauración o reparación de estos mismos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las características y las relaciones que guardan los diferentes peligros geotécnicos en los suelos, de tal manera que se tenga que llevar a cabo la respectiva estabilización con materiales minerales existentes.
- Determinar mediante revisión bibliográfica los factores que deben tratarse en todo lo relacionado a los procesos y evolución de las fisuras en el suelo de tal manera que se hallen soluciones ante los efectos negativos ocasionados por el agrietamiento (cracking). Un ejemplo de estos factores a analizar es contenido del agua (W).
- Presentar los diferentes datos y resultados realizados por múltiples autores de ámbito internacional sobre los métodos de mitigación en los suelos blandos y problemáticos.



1. VARIABLES Y PARÁMETROS DE INFLUENCIA EN EL AGRIETAMIENTO

El proceso de fisuración o agrietamiento del suelo es regido por medio de variables externas y propiedades intrínsecas del suelo que propician o previenen la formación de este tipo de aberturas en las capas de suelo. Toda esta combinación de factores puede provocar la falla del suelo y generar las fisuras iniciales que pueden desestabilizar el esqueleto de suelo y afectar sus funciones como estructuras de contención, cimientos, etc.

Dentro de las fallas por agrietamiento regidas por tensión, se encuentran la falla por tracción, que sucede cuando la contracción produce esfuerzos por tracción que supera la capacidad de resistencia del suelo (Morris et al., 1992); en este sentido, se ha demostrado que la resistencia a la tracción del suelo está ligada directamente a sus propiedades físicas, disminuyéndose de forma no lineal con el aumento del contenido de agua dentro de la masa de suelo (Tang et al., 2021). De igual forma, el proceso de agrietamiento puede ser agravado por la fuerza de corte, ya que la gravedad del suelo en los lados opuestos a la grieta inicial aumenta el esfuerzo cortante, hasta el punto de superar la capacidad de resistencia al corte del suelo (Murray & Tarantino, 2019).

1.1. PROPIEDADES INTRÍNSECAS DEL SUELO

1.1.1. Contenido de humedad

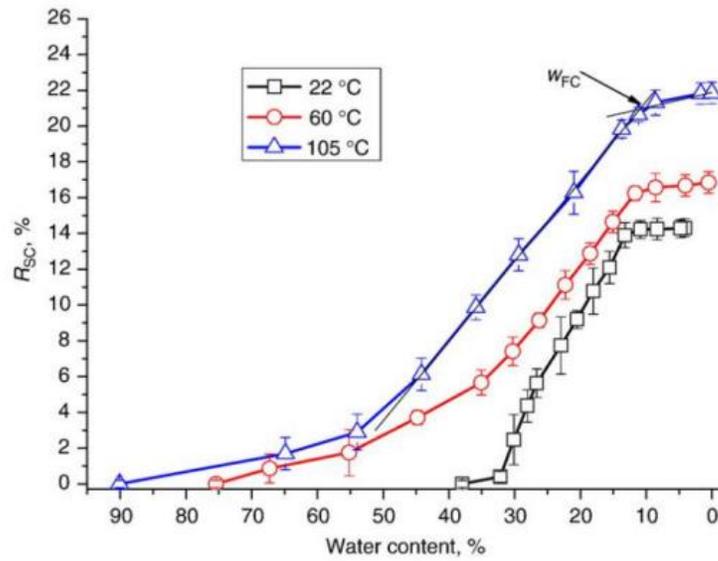
Cuando se produce una variación en el contenido de humedad de un suelo arcilloso, se genera una succión capilar del suelo, y un campo fuerza de tracción que permite la formación de las grietas iniciales, a medida que la fuerza a la tracción supera la resistencia (tracción) propia del suelo (An et al., 2020). Esta propiedad del suelo generalmente sufre variaciones por factores externos como el clima, que induce a la evaporación del agua contenida, provocando contracciones de volumen en la masa de suelo (Zeng et al., 2019).

Es por ello que se han realizado estudios para analizar la influencia de dicho parámetro en la formación de grietas, y se ha constatado que la relación de grietas en la superficie (cociente entre el área de grietas y el área total de la muestra de suelo estudiada) RSC aumentó rápidamente con la disminución del contenido de humedad en la etapa inicial de agrietamiento como se puede



evidenciar en la Figura 5; caso contrario cuando transcurren las etapas finales del proceso de desecación, en las que la relación de grietas sobre la superficie disminuye de manera significativa (Tang et al., 2010).

Figura 5. Relación de grietas en la superficie (RSC) vs el contenido de humedad.



Fuente: Tang et al., (2010).

1.1.2. Estructura interfacial

La estructura del suelo ha sido estudiada mediante diversos ensayos, que comprueban que las capas de suelo producen fricciones que inciden directamente sobre la velocidad de propagación de agrietamiento. Es decir, durante el proceso de desecación, el cambio volumétrico causa la fricción entre las distintas capas del suelo, que, al estar restringida, aumenta la velocidad de propagación de agrietamiento. Sin embargo, esta propiedad se reduce con el aumento de espesor de las capas de suelo ya que existe una relación lineal negativa entre esta y la velocidad máxima de propagación (Zeng et al., 2019). Esto último, se explica en que la evaporación comienza naturalmente en la superficie del suelo, y al tener capas más delgadas, afecta rápidamente sobre el contenido de agua en la interfase, obteniendo como resultado la contracción efectuada por la fricción interfacial; caso contrario al tener capas más gruesas, en donde la evaporación reduce la cantidad de agua



paulatinamente, impidiendo que la fricción generada pueda alcanzar el valor de resistencia a la tracción.

1.1.3. Densidad seca

Esta propiedad hace referencia a la relación entre la masa de sólidos y el volumen total de un suelo. Por lo tanto, este parámetro está determinado por las proporciones de las partículas del suelo en fase sólida y los poros del suelo. Cuando se fija la densidad relativa de las partículas del suelo, la densidad seca del suelo refleja la cantidad total de poros en el suelo, lo que en sí mismo refleja el grado de compactación del suelo. Por lo tanto, un cambio en la densidad seca suele ser un cambio en la resistencia del suelo. Estos mismos factores afectan el comportamiento de fractura del suelo, a causa de que la amenaza de agrietamiento en el cimiento de estructuras, implican suelos compactados (Xu et al., 2022). Wang et al (2007, 2007 y 2020) comprobaron que la tenacidad de fractura (definida como la resistencia del material a la propagación de grietas) es directamente proporcional a la densidad seca. La explicación de esta relación radica en que un suelo compactado, aumenta la densidad seca lo que disminuye la distancia entre las partículas de suelo; la cercanía de las partículas dispone de una mayor área de contacto entre las mismas, por ende, aumenta la fricción, y a su vez la dificultad de propagación inicial de una grieta.

1.1.4. Mineralogía y contenido de arcilla

Las arcillas expansivas cuentan con la característica de expandirse y contraerse con la variación de la humedad. La contracción es el proceso mediante el cual el volumen de la masa de suelo disminuye a causa de la pérdida de humedad; cuando dicha pérdida exceda el límite de contracción, se propician las fisuras iniciales en el suelo (Xu et al., 2022). Bajo esta directriz, distintos autores se han encargado de estimar el contenido de arcillas en el suelo y su mineralogía respectiva, para comparar las características de agrietamiento de suelo según su caracterización. Albrecht y Benson (2001) constataron que la contracción del suelo aumenta con el mayor porcentaje de esmectita, a



raíz de que los minerales de esmectita suelen adsorber más agua y sufren una mayor contracción antes de que las partículas de arcilla entren en contacto.

Las menores tensiones de contracción se obtuvieron en suelos que contenían menos esmectita y más illita, caolinita y cuarzo. Omid et al. (1996) descubrieron que las muestras que contenían montmorillonita e illita presentaban una mayor deformación volumétrica de hasta el 16,4% y 11,7%, respectivamente. Esto se debe a la fuerte hidrofilia de la montmorillonita en comparación con otros minerales. La membrana de agua alrededor de las partículas de montmorillonita es relativamente gruesa, lo que proporciona más espacio para la contracción durante el secado. Además, este mineral cuenta con una capa intermedia expandible y su área de superficie específica es lo suficientemente grande como para absorber agua en cantidades relativamente grandes (Bergaya et al, 2006).

Vogel y Hoffman (2005), realizaron una descripción cuantitativa (funciones de Minkowski) de los patrones de grieta en dos mezclas de suelo distintas con el fin de medir las propiedades geométricas de las grietas: una con igual proporción de arena y bentonita, y otra con cinco veces la cantidad de arena, por una de bentonita. El resultado que se obtuvo fue que la mezcla con menor cantidad de arcilla se contrajo menos, debido a la menor densidad de área de las grietas alcanzadas en la etapa final. Por otra parte, el resultado obtenido con la proporción de arena-bentonita igual a 5:1, fue un proceso más homogéneo, ya que no hubo evidencia de separación en las diferentes fases de la formación de grietas.

Similarmente, Chen y Ng (2013) estudiaron el impacto de las condiciones climatológicas como los ciclos de secado-humectación, utilizando dos arcillas con composición mineralógica distintas: una con mayor porcentaje de montmorillonita, y otra, con mayor porcentaje de caolín. Se evidenció que las arcilla con mayor contenido de montmorillonita sufría cambios volumétricos irreversibles ante el proceso de hinchazón y contracción del suelo, mientras que la arcilla caolinítica exhibió cambios reversibles ante la variación su contenido de humedad (Chen y Ng, 2013).

Este ha sido un punto de partida para las alternativas de solución a la problemática de agrietamiento por desecación de suelos expansivos. Por ejemplo, Khalida y Sattar (2012) comprobaron que la adición de humo de sílice reduce los problemas de hinchamiento y contracción, al reducir la



cantidad de arcilla con respecto al volumen total de la muestra, y que, la que queda presente en la masa de suelo, interacciona con los minerales arcillosos y limosos.

Tang et al. (2019), confirmó en el estudio de caracterización de grietas de desecación de arcilla compactada mediante el uso de rayos x, que la contracción volumétrica y las consiguientes grietas en suelos arcillosos están estrechamente relacionadas con la cantidad de minerales de arcilla y su fuerte hidrofilia, especialmente de la Montmorillonita y la Illita, que contribuyen al alto potencial de hinchamiento intrínseco y a la baja conductividad hidráulica, como también un fuerte comportamiento de contracción volumétrica durante el proceso de desecación.

1.2. PROPIEDADES EXTERNAS

1.2.1. Temperatura

La temperatura es un factor que incide de forma directa dado el hecho de que es el causante principal de la evaporación por la cual se desecan los suelos. El estudio realizado por Tang et al. (2010), sugiere que una mayor temperatura en el proceso de desecación aumenta proporcionalmente la tasa de evaporación. Esto quiere decir que el proceso la desecación de los suelos será de manera más rápida y brusca, de manera que el contenido de agua mínimo en el que el suelo falla y se agrieta por primera vez, será mayor, en comparación con el contenido de agua mínima en la que un suelo falla a una temperatura menor. Similarmente, el contenido de agua crítico final (humedad en la que no se desarrollan más grietas de forma notable) determinado por la curva de agrietamiento se puede correlacionar con el límite de contracción, y está influenciado ligeramente por la temperatura.

1.2.2. Ciclos de humectación-secado

Los fenómenos naturales, como períodos extensos de sequía precedentes de temporadas invernales, afectan directamente las propiedades hidromecánicas de los suelos compactados (Cheng et al., 2022). Para el estudio de impacto de este tipo de fenómenos en la propagación de grietas en el



suelo, se han utilizado pruebas de compresión isotrópica, controladas por succión y sometidas a diferentes fases de humectación y secado. Se pudo comprobar mediante dicho ensayo que la presencia de montmorillonita es un factor determinante en el comportamiento volumétrico del suelo: durante el proceso de humectación, el suelo sufrió hinchazón irreversible; en la fase de secado, sufrió contracción irreversible y posteriormente hinchazón acumulada al ser sometido al ciclo de humectación-secado. En este sentido, las diferentes fases mencionadas con anterioridad también inciden en la tensión previa a la consolidación del suelo, esto se debe al hinchamiento irreversible que junto a la variación del grado de saturación producen cambios en la textura del suelo y un desarrollo de vacíos de mayor tamaño en la microestructura del suelo, causando que la estructura del suelo sea más susceptible a ceder ante cargas externas (Chen & Ng, 2013).

1.3. DIFERENCIA ENTRE CONTRACCIÓN Y FISURAMIENTO EN LOS SUELOS

El agrietamiento por desecación es un fenómeno natural inducido por la deshidratación de las capas de suelo cercanas a la superficie en ciclos repetitivos de hinchazón y contracción (Tang et al., 2008). Las fisuras producidas, modifican considerablemente las condiciones de la trayectoria del flujo hidrológico, aumentan la meteorización de suelos y perjudican su capacidad de retención de agua, lo que produce un agravamiento de la erosión del suelo. Cuando se refiere al suelo como un material de carácter constructivo, es necesario conocer el fenómeno de fisuramiento por desecación, dado que la presencia de grietas aisladas o coalescentes en las capas de suelo cercanas a la superficie generan disminución en las propiedades mecánicas del suelo, como la resistencia, o deformaciones excesivas, que finalmente pueden ser causantes del fallo de cimientos o estructuras de tierra. Los sistemas de grietas formados por este fenómeno, se encuentra comúnmente en las regiones áridas y semiáridas (Tang et al., 2021).

El mecanismo general de agrietamiento de suelos consiste en que la contracción (reducción del volumen de suelo a causa de pérdida de humedad) por desecación del suelo está restringida por distintos factores (climáticos, mineralógicos, mecánicos, etc.), y la tensión concentrada en el interior del suelo supera su resistencia a la tracción (Zeng et al., 2020).



2. PROCESO DE FISURAMIENTO DE SUELOS VULNERABLES

Los estudios indican que el mecanismo intrínseco del agrietamiento es un fenómeno complejo. Está relacionado con propiedades físicas, químicas, mecánicas e hidráulicas del suelo, incluyendo la proporción de arcilla, la composición mineral la condición de compactación, y el contenido inicial del agua. En este sentido, en el caso más común de agrietamiento se produce cuando el contenido del agua presente en el suelo se evapora y sobrepasa el límite de contracción volumétrica, causando la aparición de las grietas iniciales en la superficie del suelo (Tang et al., 2021); aunque algunos estudios afirman que algunas grietas podrían iniciarse dentro del subsuelo hacia la superficie de la tierra.

Las grietas iniciadas en el subsuelo son difíciles de observar y son omitidas en la mayoría de los casos, no obstante, cuando estas se propagan y emergen a la superficie del suelo, reflejan un alto grado de fisuración (Zeng et al., 2020). Ahora bien, debido a la complejidad de la estructura del suelo, y la cantidad de parámetros y variables que inciden sobre la formación de una grieta, no se ha establecido un método universal que concluya cuál es la mecánica de agrietamiento del suelo, y los posibles espesores y profundidad de grieta (Lu et al., 2021). Por ello, se le ha dado dos enfoques de estudio al proceso de agrietamiento por desecación al suelo, que son los siguientes: La descripción cualitativa de Baker, (1981); Konrad y Ayad, (1997) basada en la observación directa y el análisis cuantitativo de Vogel et al., (2005); Lakshmikantha et al., (2009) basado en técnicas de procesamiento de imágenes.

2.1. ANÁLISIS CUANTITATIVO

El análisis cuantitativo de agrietamiento de suelos comúnmente se realiza mediante el estudio de procesamiento de imágenes de la masa del mismo. Los beneficios de la utilización de este tipo de técnicas radican en la obtención de resultados, que, mediante la descripción cuantitativa, permiten caracterizar geométrica y cinemáticamente el patrón de grietas en la superficie.

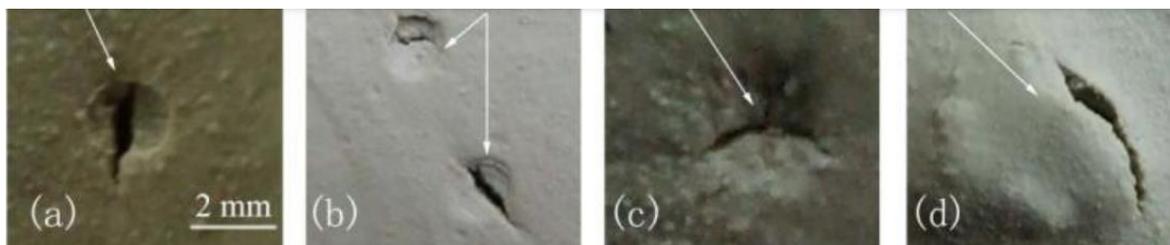
Tang et al (2001) caracterizó el proceso de agrietamiento por desecación de un suelo arcilloso Xiashu del área de Nanjing, china; para ello, se obtuvieron las propiedades físicas del suelo

mediante ensayos de Gravedad específica, estados de consistencia y granulometría. Se preparó el material dejándolo secar al aire, triturándolo y tamizándolo a 2mm. Luego, como primer paso para la desecación, se preparó una mezcla de suelo con el material previamente tratado y agua destilada (equivalente a un contenido del 90%), para ser vertido en placas de vidrio de 16 x 16 cm (cubiertas con una membrana de plástico durante al menos 72 horas), resultando un espécimen con un espesor de 8mm en los contenedores (se repitió el proceso dos veces más, obteniendo tres especímenes diferentes).

Para el proceso de desecación, las muestras de suelo fueron pesadas antes de ser puestas en el horno a 40°C y luego a humedad relativa de 32% aproximadamente. Simultáneamente, usaron una cámara digital fijada directamente encima de las muestras para controlar la evolución del patrón de grietas de la superficie. Se tomaron fotografías y se utilizaron posteriormente para el análisis de imágenes. Los autores comprobaron que, durante el proceso de secado, la evaporación de agua consta de dos fases: la primera con una tasa de evaporación constante, en la cual primaba la disminución del contenido de humedad del suelo de forma lineal, conforme al paso del tiempo; luego, la tasa de evaporación descendía después de aproximadamente 610 minutos de secado. Intrínsecamente a la evaporación del agua, el contenido de agua en el suelo disminuye, aumentando de forma gradual la succión del suelo.

En la Figura 6, se muestran las grietas iniciales que se forman debido al aumento en el campo de tracción horizontal en la capa superior de los especímenes. El esfuerzo de tracción aumenta de igual forma, a medida que procede la evaporación del agua, y al superar la resistencia a la tracción, se producen las grietas iniciales en la superficie (Tang et al, 2011).

Figura 6. Grietas iniciales en la superficie del suelo.

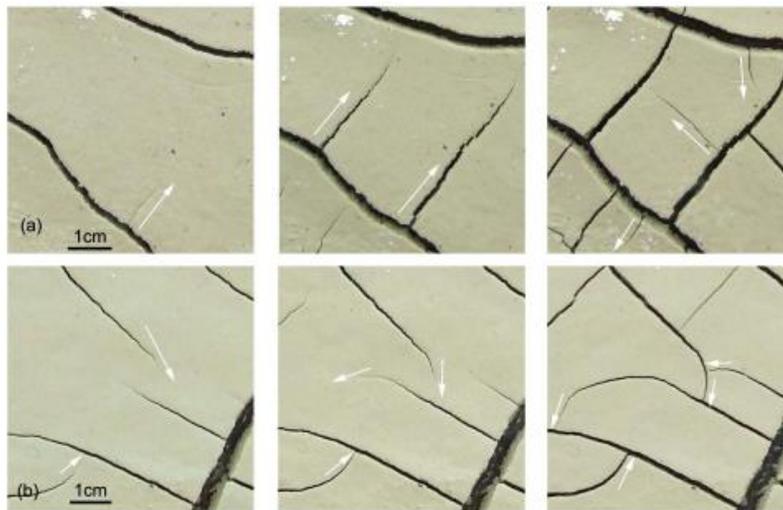


Fuente: Tang et al., (2011).



Las grietas iniciales se propagaron tanto en el plano horizontal como vertical, y se comprobó que, en todos los casos, las nuevas grietas comenzaban perpendiculares a las existentes como se evidencia en la Figura 7, a causa de que, una vez iniciada la grieta, el esfuerzo de tracción interno perpendicular al plano de la grieta existente ya se ha liberado, y la nueva dirección del esfuerzo de tracción máximo debe ser entonces paralela al plano de la grieta existente. En consecuencia, la dirección inicial de las grietas secundarias que parten de la grieta existente será siempre perpendicular. Así, la grieta de desecación que se propaga se dirige gradualmente hacia la grieta preexistente hasta que finalmente se cruzan en ángulo recto (Tang et al, 2011).

Figura 7. Formación de grietas secundaras perpendiculares a las grietas iniciales.



Fuente: Tang et al, (2011).

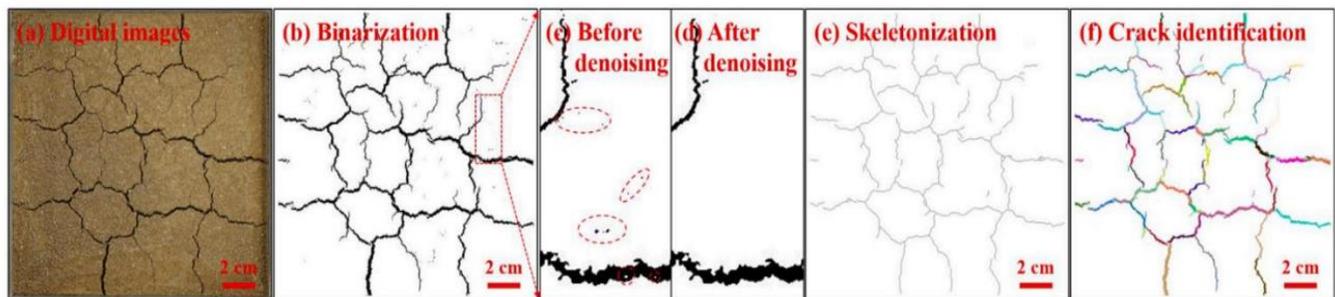
Homólogamente, Cheng et al. (2022) realizaron el estudio cuantitativo del proceso de agrietamiento por desecación con un sedimento eólico de Nanjing (China) sometido a compactación en tres diferentes porcentajes de humedad (12%, 16,5% y 20,5%), por medio del procesamiento de imágenes en el software *Crack Image Analysis System* que se muestra en la Figura 8, el cual consta de cuatros pasos: Binarización (conversión de imágenes digitales en binarias, para obtener distinción clara entre terrones y grietas), eliminación de ruido y puntos mal

identificados en la binarización, esqueletización (extracción del esqueleto de redes de fisura para determinar los nodos y longitudes de fisura), e identificación de grietas.

El procesamiento de imágenes de muestras de suelo (12% de humedad de compactación) mostró la simultaneidad de las grietas por desecación en múltiples puntos de la superficie y una grieta en forma de “Y” con un ángulo de intersección de 120° . Por otra parte, en las muestras con w_c igual a 20,5%, el agrietamiento inicia con una fisura ancha y larga en la superficie de la muestra, que con la evaporación de agua origina sub-grietas o grietas secundarias perpendiculares a ella (90°).

El análisis de imágenes de Cheng et al. (2022) también proporcionó resultados sobre otros parámetros característicos del fenómeno de agrietamiento, como la velocidad de propagación de grietas. En la Figura 9, la velocidad de propagación de grietas no es constante, aumenta con la disminución de contenido del agua, alcanza un pico y luego disminuye a cero. A medida que aumenta la humedad de compactación, la duración del desarrollo de grietas se acorta y la velocidad máxima de propagación de grietas muestra una tendencia a aumentar.

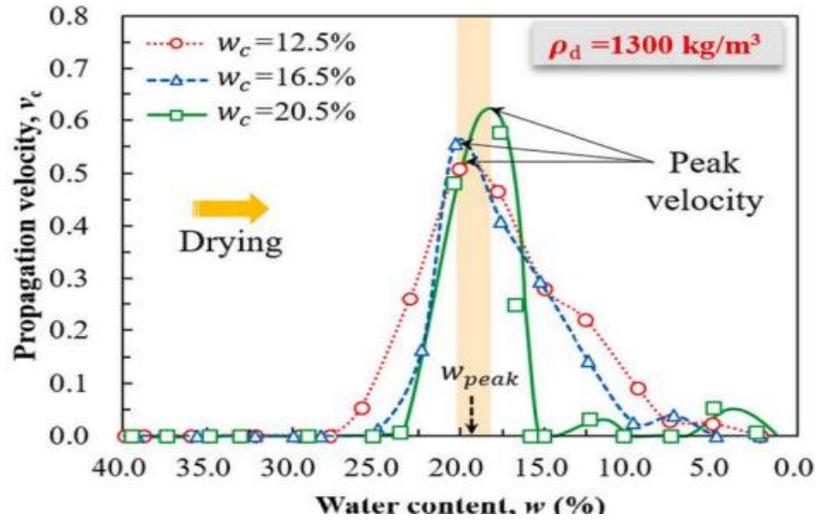
Figura 8. Procesamiento de imágenes.



Fuente: Cheng et al, (2022).



Figura 9. Velocidades de propagación de grietas.



Fuente: Cheng et al, (2022).

Se comprobó entonces, que la velocidad de propagación divide el proceso de agrietamiento del suelo en dos etapas: extensión de la longitud de la grieta, cuando la velocidad de propagación se acerca a su máximo valor; y el ensanchamiento de la grieta, cuando dicha velocidad alcanza su punto máximo, lo que indica que la red de grietas ya se ha formado, por lo que la longitud no varía (Cheng et al, 2019).

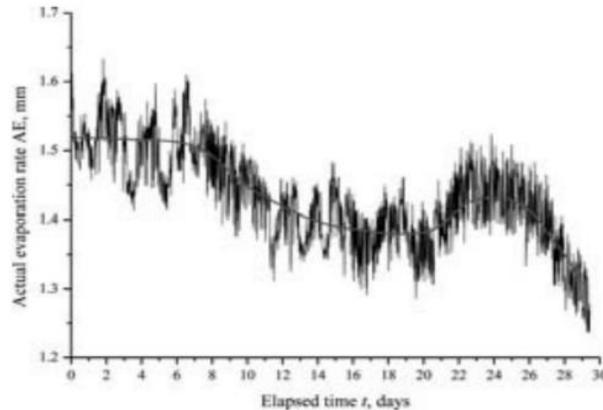
Los estudios mediante imágenes, también se han llevado a cabo a escalas mayores, con tecnologías más avanzadas que han permitido la especificación en los resultados de algunas de las características del proceso de agrietamiento por desecación en los suelos. Tal es el caso del estudio realizado por Cui et al. (2014), en el cual se desarrolló una cámara ambiental especial (con dimensiones L x W x H: 1000 x 800 x 1550 mm) y sensores para medir las propiedades del suelo diferenciando la profundidad en la que ocurre cada fenómeno como se representa en la Figura 10.

Primeramente se evidenció que las grietas se iniciaron junto a la disminución de la tasa de evaporación y que durante varios ciclos de secado las grietas empiezan a aparecer en los mismos lugares de secado anterior, debido al rompimiento de enlaces de partículas: al humedecerse, los enlaces rotos pueden atraer agua y convertirse en zonas débiles de suelo; al secarse, se provoca



contracción en las zonas débiles y se producen las grietas, que tras un mayor secado conforma redes de grietas conectadas con ángulos entre sí de 120 (forma de T), y ángulos rectos (90°).

Figura 10. Variación de la tasa de evaporación con respecto al tiempo.



Fuente: Cui et al., (2014).

En este sentido, el estudio realizado por Cui et al. (2014), ofreció cuatro resultados importantes:

- **Relación de fisuras superficiales (R_{sc}):** Se evidenció que con la disminución del contenido de agua, la cantidad de grietas por unidad de superficie incrementó hasta un valor final de 33,7%, lo que indica que el suelo está en un 33,70% cubierto por grietas.
- **Número de terrones y área promedio de terrones:** La disminución en el contenido de agua también influyó en la formación de terrones, que cambiaron de 1 a 7, resultando en una disminución en el área promedio de los terrones, que fueron haciéndose más estrechos. El número final de terrones formados fue de 41, ya que durante los últimos ciclos de secado no aumentó el valor, en contraste de su área promedio, que siguió decreciendo. Lo que sugiere que las grietas siguen ensanchándose aun cuando no haya formación de nuevas grietas.
- **Número de nodos y número de segmentos:** Estos dos valores aumentan de forma lineal y progresiva desde la disminución de un contenido de agua específico (para el caso de estudio igual a 47,6%) y se estabilizan cuando la humedad es del 32,5%, que indica que



no hay formación de nuevas grietas ante el secado adicional. Se estimó entonces que el número de nodo y de segmentos cumple con una relación entre 1,5-2,0.

- **Longitud promedio de grietas y ancho promedio de las grietas:** La humedad también juega un papel importante en este parámetro, debido a que, en cierto contenido de humedad con tendencia a disminución durante el secado, se estabiliza la longitud promedio de grietas (obtuvieron una longitud final de grieta de 84,2 mm). Similarmente ocurre con el ancho promedio de grieta, que aumenta lentamente en la tapa inicial de agrietamiento y rápidamente cuando el contenido de agua es inferior a 41,9%, llegando a un valor de 19,1mm.

2.2. ANÁLISIS CUALITATIVO

Por otra parte, la descripción cualitativa consiste en la observación directa del proceso de agrietamiento mediante la simulación de condiciones y ciclos de humectación y secado, con el fin de medir propiedades básicas de la morfología de las grietas y establecer datos de entrada para el modelamiento y predicción de grietas futuras. Adicionalmente, los estudios de tipo cualitativo miden las fuerzas, presiones y condiciones exactas que hacen que el suelo falle.

Baker (1981), estableció un método de predicción de grietas a partir de un modelo teórico con aplicaciones de sistemas de ecuaciones no lineares obtenidas por el método de Newton-Raphson. Para ello caracterizó condiciones físicas del suelo, tales como: espesor del suelo, ángulo de fricción, cohesión, y peso unitario húmedo.

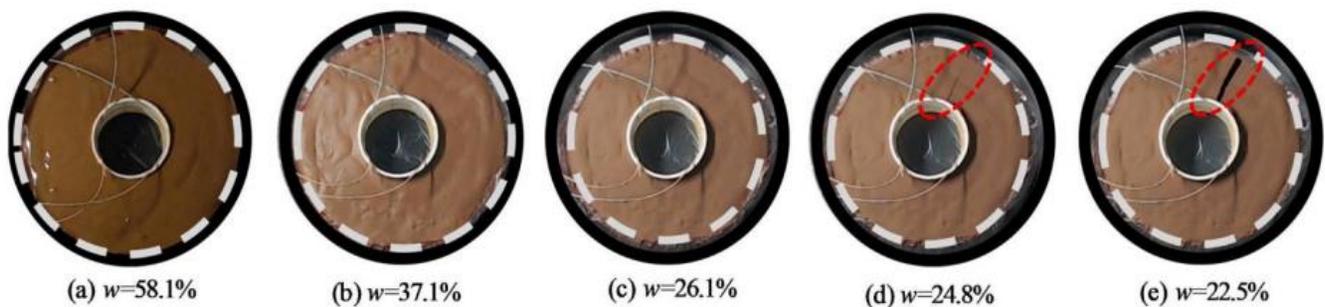
Los resultados de la aplicación de la solución particular obtenida en el suelo estudiado, proporcionó información sobre la caracterización de grietas, por ejemplo, se llegó a la conclusión de que la profundidad máxima de las grietas de tensión es el 25% de la altura del talud, y este valor se da para los taludes verticales; de igual manera, pudo establecer que el aumento del número de estabilidad (disminución de la altura crítica) que corresponde a la grieta máxima es del orden del 20%. Esto es válido para las grietas que no están llenas de agua.

Recientemente, se han planteado nuevos métodos para la inspección y caracterización física del suelo agrietado. Tal es el caso del ensayo de anillo restringido mediante la técnica de Bragg con fibra óptica mostrado en la Figura 11, aplicado por Cheng et al (2020).

El ensayo está compuesto por dos anillos (interior y exterior) cuya altura es el mismo espesor del suelo, sobre los cuales se coloca la muestra. Se colocan dos sensores FBG en la mitad del anillo interior y una cámara en la parte superior con el fin de monitorear el esfuerzo a tracción máximo de la masa de suelo.

Los resultados propuestos por los autores mencionados con anterioridad, indican que, durante el proceso de humectación y secado, el suelo experimenta las siguientes etapas:

Figura 11. Ensayo de anillo restringido mediante la técnica de Bragg con fibra óptica.



Fuente: Cheng et al (2020).

- La deformación vertical ocurre durante la etapa temprana de secado cuando el contenido de agua es relativamente alto.
- Con la disminución del contenido de agua, se observa una contracción lateral de la muestra de suelo y la muestra se separa del anillo exterior.
- Con una mayor disminución del contenido de agua a alrededor del 24,8 %, la tensión de tracción inducida por la succión alcanza la resistencia a la tracción y se produce la figuración por desecación, como se marca con el círculo rojo en la Figura 11.

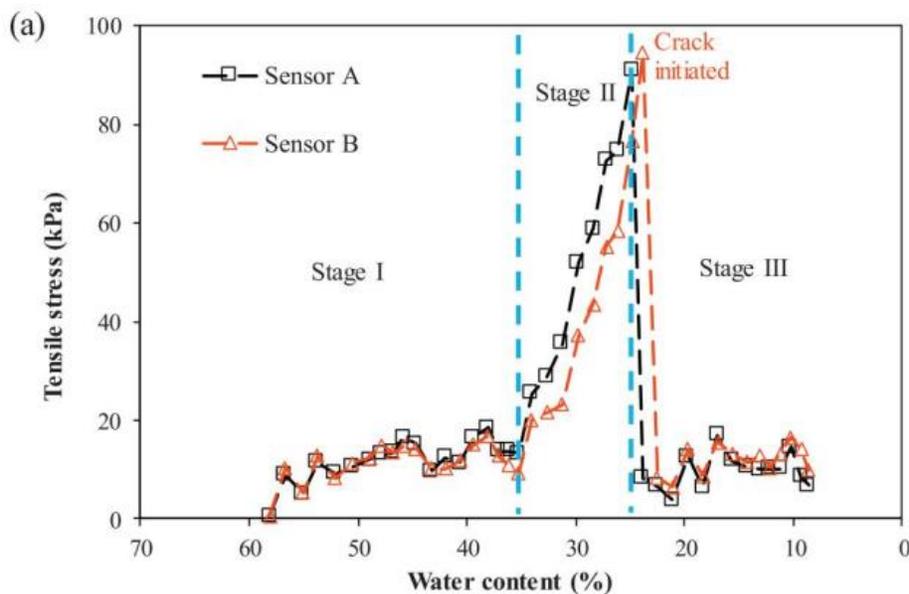
En este orden de idea, los resultados obtenidos en el ensayo, y recopilados por los sensores, permiten establecer curvas características del suelo para mayor estudio y predicción de nuevas grietas.



En la Figura 12, la curva de contenido de humedad vs tensión evidenció que el suelo termina inmerso en una etapa residual (o etapa III) cuando es sometido a ciclos de humectación y secado, etapa cuyo inicio se da desde que el contenido de agua se encuentra por del límite de contracción.

En esta parte del proceso de desecación, las deformaciones del suelo son irreversibles, y las grietas dejan de desarrollarse de forma agresiva, debido a la baja fuerza de tracción del suelo, que ya fue liberada en grietas iniciales (Cheng et al., 2020).

Figura 12. Curva de contenido de humedad vs tensión.



Fuente: Cheng et al., (2020).

Shepidchenko et al (2020), desarrollaron un ensayo distinto al de Cheng et al (2020) con el fin de caracterizar mediante observación directa el proceso de agrietamiento.

En la Figura 13 se presenta el ensayo que consiste en la utilización de una máquina simuladora de grietas diagenética y un secador de aire de laboratorio, para estimar el proceso de formación de micro fisuras en una masa de suelo arcilloso. La máquina simuladora inducía al secado de las muestras de suelo mediante placas calentadas experimentalmente a una temperatura máxima de 125°C que influyó directamente sobre el secado del suelo.

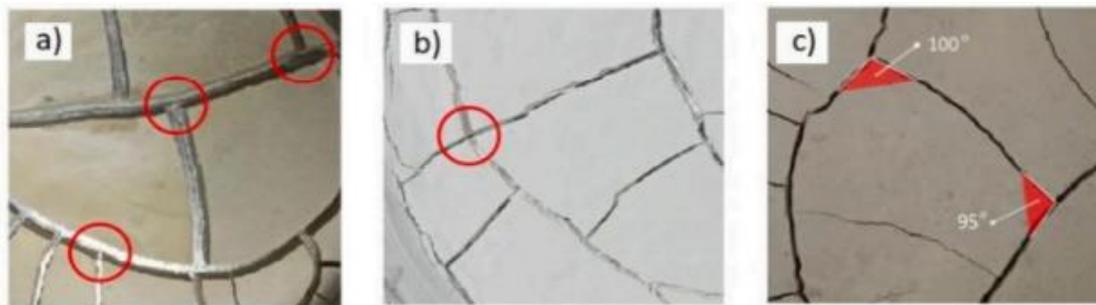


Sobre la máquina se colocó una cámara para capturar los momentos exactos de formación de grietas, esta permitió que los autores pudieran caracterizar mediante observación directa el ángulo de intersección entre las grietas, y los patrones de grietas formados (ver Figura 13).

Dado que se usaron arcillas con distinta mineralogía, los resultados propuestos por Shepidchenko et al (2020), arrojaron que:

- Las temperaturas de 100°C y 230°C indujeron más grietas por desecación en soluciones minerales puras, mientras que las muestras mixtas no mostraron ninguna propagación adicional de grietas.
- El ancho de la fisura aumenta con el espesor de la capa. Además, el 92% de todas las muestras exhibieron el patrón de tres brazos, donde la distribución del ángulo estaba entre 90-100 y 170-180°.
- La formación de la primera fisura también depende del tipo de arcilla y varía en el tiempo dentro de un orden de temprano a tardío: montmorillonita, caolinita, illita.

Figura 13. Ensayo de la maquina simuladora de grietas diagenetica.



Fuente: Shepidchenko et al (2020).

En la Tabla 2, se mostrará una tabla resumen de los tipos de estudios tanto cualitativos como cuantitativos con sus respectivos autores, objetivos y sus breves resultados de investigación.



Tabla 2. Tabla resumen de los análisis cuantitativos y cualitativos de los diferentes estudios por autores.

Tipo de estudio	Autor	Título	Objetivo	Resultado
Análisis morfológico cuantitativo	Tang et al (2001)	Investigación experimental del comportamiento de agrietamiento por desecación de las capas del suelo durante el secado	Estudiar parámetros incidentes sobre el agrietamiento y estudio morfológico de las grietas	Las grietas iniciales se forman tanto en el plano vertical como en el horizontal. La dirección de las grietas secundarias son perpendiculares a las grietas iniciales
	Cheng et al (2022)	Investigación sobre el comportamiento de agrietamiento por desecación de suelos arcillosos con una perspectiva de mecánica de fractura: una revisión	Analizar el proceso de agrietamiento bajo tres contenidos de humedad iniciales distintos	Simultaneidad de grietas por desecación en la superficie y formación de grieta en forma de Y. Variación de la velocidad de compactación a lo largo de los ciclos de humectación y secado.
	Cui et al (2014)	Investigación del agrietamiento por desecación del suelo utilizando una cámara ambiental	Establecer un modelo físico que permita estudiar el proceso de agrietamiento por desecación a mayor escala que los estudios convencionales	La disminución de contenido de agua aumenta la cantidad de grietas por unidad de superficie y el número de terrones formados. El ancho y longitud de la grieta inicial varían depende al contenido de humedad de la muestra de suelo.



Caracterización cualitativa (observación directa)	Baker (1981)	Resistencia a la tracción, grietas por tensión y estabilidad de taludes	Descripción de un procedimiento para la evaluación del efecto de la resistencia a la tracción en la estabilidad de taludes	La profundidad máxima de las fisuras por tensión es del 25% de la altura del talud, y este valor se da para taludes verticales. El aumento del número de estabilidad (disminución de la altura crítica), que corresponde a una fisura máxima, es del orden del 20%. Esto es válido para grietas que no están llenas de agua.
	Cheng et al (2020)	Comportamiento a la tracción de suelos arcillosos durante el proceso de agrietamiento por desecación	Estudio de tracción y temperatura en el proceso de desecación de suelos mediante prueba FGB	<ul style="list-style-type: none"> • La deformación vertical ocurre durante la etapa temprana de secado cuando el contenido de agua es relativamente alto. • Con una mayor disminución del contenido de agua a alrededor del 24,8 %, la tensión de tracción inducida por la succión alcanza la resistencia a la tracción y se produce la figuración por desecación
	Shepidchenko et al (2020)	Estudio experimental de los principales factores de control de la formación de grietas de desecación de lodo a lutita	Estudio de influencia de mineralogía de arcillas en mecanismos de formación y distribución de grietas	<ul style="list-style-type: none"> • Las temperaturas de 100°C y 230°C indujeron más grietas por desecación en soluciones minerales puras, mientras que las muestras mixtas no mostraron ninguna propagación adicional de grietas. • El ancho de la fisura aumenta con el espesor de la capa. Además, el 92% de todas las muestras exhibieron el patrón de tres brazos, donde la distribución del ángulo estaba entre 90-100 y 170-180°.

Fuente: Autores, (2022).

2.3. MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL FISURAMIENTO

En la Tabla 3, se muestra los distintos métodos para la medición de las grietas en distintos tipos de suelos investigados con sus respectivos autores, donde se evidencia que el 82% aplicado es por el método de visualización por procesamiento de imágenes, CIAS, DIC con un total de 19 aplicaciones por parte de 23 autores que citamos.

Tabla 3. Métodos de medición del fisuramiento en distintos tipos de suelos.

#	Autor	Tipo de suelo	Técnica				
			Visualización (Procesamiento de Imágenes, CIAS, DIC, etc.)	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	Sensor de movimiento/fuerza	Fibra óptica	Rayos X
1	Cheng et al (2020)	Arcillas del río Yangtze, Nanjing, China				✓	
2	Cui et al (2014)	Arcilla de Romainville, París			✓		
3	Zeng et al (2019)	Arcilla Xiashu, Nanjing, China	✓				
4	Zeng et al (2022)	Arcilla de Romainville, París	✓				
5	Chaduluva et al (2022)	Arcilla de Nanded, Maharashtra, India	✓				
6	Baer J.U (2009)	Arcilla Marga limosa de México	✓				
7	Zhong-Sen (2022)	Arcilla blanda de Malmi, Finlandia	✓				
8	Rent et al (2022)	Arcilla de Baicheng, China	✓				
9	Ameur & Hattab (2022)	Caolinita K13 de Sibelco, París	✓		✓		



10	Zhang et al (2019)	Caolinita y Bentonita comercial de Jiangsu, China	✓				
11	Wan et al (2019)	Arcillas de Wuhan, China	✓				
12	Cordero et al (2021)	Arcilla de baja plasticidad de Barcelona	✓				
13	Gao et al (2021)	Arcilla roja del sur de China	✓				
14	Lu et al (2022)	Arcilla Xiashu, Nanjing, China	✓				
15	Costa et al (2012)	Arcilla de Werribee, Melbourne, Australia	✓				
16	Trabelsi et al (2012)	Arcilla de Beja, Túnez	✓				
17	Gao et al (2015)	Arcilla de Nanjing, China		✓			
18	Shokri & Keshmiri (2015)	Bentonita sódica	✓	✓			
19	Tang et al (2008)	Arcilla de Nanjing, China	✓				
20	Tollenaar et al (2017)	Arcilla de río (Ve-Ka, K-10000)	✓				
21	El-Halim (2017)	Arcilla de Desouk, Egipto	✓				
22	Hun et al (2021)	Arcilla de Romainville, París	✓				
23	Tang et al (2019)	Arcilla de Nanjing, China					✓

Fuente: Autores, (2022).



2.4. MÉTODOS DE MODELAMIENTO DEL FISURAMIENTO

En la Tabla 4, se muestra los distintos métodos de modelamiento para las grietas en distintos tipos de suelos investigados con sus respectivos autores, donde se evidencia que el 40% aplicado es por el modelamiento por elementos finitos y el 30% por el modelamiento por elementos discretos, siendo estos dos los más destacados a la hora de su uso para distintas investigaciones de parte de 20 autores que citamos.

Tabla 4. Métodos de modelamiento del fisuramiento en distintos tipos de suelos, parte 1.

#	Autor	Tipo de suelo	Modelamiento				
			Elementos finitos	Elementos discretos	Modelo de Centrifugación	Método probabilístico de conteo de cajas	Fotogrametría SfM
1	Chaduluva et al (2022)	Arcilla de Nanded, Maharashtra, India			✓		
2	Baer J.U (2009)	Arcilla Marga limosa de México				✓	
3	Zhong-Sen (2022)	Arcilla blanda de Malmi, Finlandia					✓
4	Rent et al (2022)	Arcilla de Baicheng, China				✓	
5	Gao et al (2021)	Arcilla roja del sur de China	✓				
6	Vogel et al (2005)	Arcilla					
7	Zhu et al (2020)	Arcilla		✓			



8	Veveakis & Poulette (2021)	Arcilla	✓				
9	Trabelsi et al (2012)	Arcilla de Beja, Túnez	✓				
10	Vo et al (2017)	Arcilla	✓				
11	Peron et al (2009)	Arcilla	✓	✓			
12	Hun et al (2021)	Arcilla					
13	Hirobe & Oguni (2016)	Arcilla	✓				
14	Lin et al (2021)	Arcilla		✓			
15	Stirling et al (2017)	Arcilla de Durham, Inglaterra	✓	✓			
16	Tran et al (2019)	Luvisol	✓				
17	Tran et al (2019)	Arcille de Werribee, Australia					
18	Sima et al (2014)	Arcilla de Romainville, París		✓			
19	Salimi et al (2021)	Arcilla					
20	Yan et al (2021)	Arcilla		✓			

Fuente: Autores, (2022).

**Tabla 5.** Métodos de modelamiento del fisuramiento en distintos tipos de suelos, parte 2.

#	Autor	Tipo de suelo	Modelamiento				
			Módulo de Vogel (Muelles Hookeanos de fuerza finita)	Modelo de campo de fase	Método smoothed- particle hydrodynamics (SPH)	Método híbrido (elementos continuos-discretos)	Modelo de curva característica de resistencia a la tracción
1	Chaduluva et al (2022)	Arcilla de Nanded, Maharashtra, India					
2	Baer J.U (2009)	Arcilla Marga limosa de México					
3	Zhong-Sen (2022)	Arcilla blanda de Malmi, Finlandia					
4	Rent et al (2022)	Arcilla de Baicheng, China					
5	Gao et al (2021)	Arcilla roja del sur de China					
6	Vogel et al (2005)	Arcilla	✓				
7	Zhu et al (2020)	Arcilla	✓				
8	Veveakis & Poulette (2021)	Arcilla					



9	Trabelsi et al (2012)	Arcilla de Beja, Túnez					
10	Vo et al (2017)	Arcilla					
11	Peron et al (2009)	Arcilla				✓	
12	Hun et al (2021)	Arcilla		✓			
13	Hirobe & Oguni (2016)	Arcilla					
14	Lin et al (2021)	Arcilla					
15	Stirling et al (2017)	Arcilla de Durham, Inglaterra					
16	Tran et al (2019)	Luvisol					
17	Tran et al (2019)	Arcille de Werribee, Australia				✓	
18	Sima et al (2014)	Arcilla de Romainville, París					
19	Salimi et al (2021)	Arcilla					✓
20	Yan et al (2021)	Arcilla					

Fuente: Autores, (2022).



Las consecuencias de la problemática de agrietamiento por desecación en suelos arcillosos afectan directamente a estructuras de ingeniería, incluyendo presas, taludes y cimentaciones, a causa de una variación en las propiedades mecánicas y volumétricas del suelo, tales como la permeabilidad, la compresibilidad y resistencia mecánica del mismo (Vo et al., 2017). Por ello, las técnicas de estudio para el fenómeno de agrietamiento por desecación se han abarcado desde una gran variedad de métodos y enfoques, puesto que es un proceso complejo que depende de múltiples variables, como la temperatura, mineralogía, salinidad, espesor de la capa de suelo, entre otras.

La técnica de medición de grietas para ensayos a pequeña escala se basa generalmente en el procesamiento de imágenes obtenidas mediante cámaras digitales puestas sobre la máquina de ensayo de desecación a utilizar. Ahora bien, se han empleado diferentes métodos para el procesamiento de imágenes digitales, entre los cuales están los siguientes.

2.4.1. Sistema de procesamiento de imágenes de grietas (CIAS)

Propuesto por Tang et al (2008), consiste en la conversión de la imagen digital obtenida por la cámara, hacia una imagen en escala de grises y esqueletada, que permita diferenciar las grietas y terrones del suelo, y obtener propiedades como el área de grieta, longitud, número de nodos, etc. El método consiste en varios pasos básicos, comprendidos por: Conversión a escala de grises; binarización de imagen, mediante contraste de grises entre grietas y masa de suelo (usando umbral de gris); esqueletización, aplicando el método de transformación del eje medio, por el que se extrajo la línea media del segmento de grieta como el esqueleto de la red de grietas. Cabe destacar que todo el procedimiento fue realizado por el autor mediante el software CIAS.

Esta técnica permite estimar los siguientes parámetros de agrietamiento: Ancho de grieta, longitud de grieta, número de terrones, factor de intensidad de grieta, etc.

2.4.2. Velocimetría de imágenes de partículas (PIV)

Es un método no intrusivo basado en la velocidad de propagación (o trazo) de un fluido, medida mediante una cámara o láser. Chaduvula et al (2022) usó esta técnica con el fin de comprender mejor el fenómeno de propagación de grietas con respecto al tiempo (en días). Los resultados obtenidos



fueron imágenes de agrietamiento de la muestra de suelo ensayada a pequeña escala, que sirvieron como datos de entrada para el procesamiento de imágenes en el software Matlab, usando el código GeoPIV_RG (Stainer et al, 2016).

Esta técnica permite obtener valores de parámetros como: Tiempo de iniciación de la grieta, Facto de intensidad de grieta, ratio de reducción de grieta, deformación por contracción, etc.

2.4.3. Método de correlación de imágenes digitales (DIC)

Es una técnica fundamentada en la medición tridimensional de los desplazamientos, deformaciones y amplitudes de vibración en la masa de suelo. Ameer & Hatab (2009), usaron dicha técnica (con el software VIC-2D) para medir los cambios en la masa de un suelo arcilloso ante ciclos de humectación y secado.

El principio de la medición DIC se resumió entonces en el desplazamiento a lo largo del eje vertical y horizontal de la masa de suelo, y el post-procesamiento de datos como deformaciones locales (hinchazón representada como valor positivo, y contracción como valor negativo). Un sensor de fuerza acompaña todo el test de desecación para obtener los datos precisos de succión, carga de flexión, deformación, etc.

Sin embargo, no todos los ensayos para los estudios de agrietamiento consisten en la visualización mediante cámaras digitales y procesamiento de imágenes, también se encuentran métodos propuestos como la Microscopía electrónica de Barrido – SEM (Gao et al, 2015; Shokri & Keshmiri, 2015), sensores de movimiento (Cui et al, 2014; Ameer & Hatab, 2009), fibra óptica (Cheng et al, 2020) y rayos x (Tang et al, 2019).

En contraste a lo anterior, se encuentran los métodos de predicción o modelación de grietas, que son ejecutados a partir de teorías numéricas que plantean una solución única, teniendo en cuenta datos de entrada, ya sean tomados en campo o recopilados de anteriores bibliografías. Los métodos con mayor reconocimiento y resultados favorables en el caso de agrietamiento por desecación de suelos arcillosos son los siguientes.



2.4.4. Método de elementos discretos

Consiste en la discretización temporal para las ecuaciones de movimiento que rigen el movimiento y la rotación de partículas de una masa de suelo. El método de los elementos discretos permite simular la red de grietas teniendo en cuenta propiedades como la contracción, expansión y grietas de iniciación a nivel microscópico (Peron et al, 2009; Zhu et al, 2020).

2.4.5. Método de elementos finitos

Se justifica en la proposición del reemplazo de un número infinito de variables desconocidas, por un número restringido de elementos de comportamiento bien definido. Los valores de entrada de este método son influenciados por el comportamiento heterogéneo del suelo; algunos ejemplos son: conductividad transversal, conductividad hidráulica, presión, los estudios realizados buscan básicamente reproducir correctamente las principales fases de desecación y el desarrollo de la contracción del suelo frente al tiempo transcurrido (Vo et al, 2017).

Existen además otros métodos usados para la modelación de grietas por desecación en suelos arcillosos, como Método probabilístico de conteo de cajas (Baer, 2009; Rent et al, 2022), Modelo híbrido entre método discreto y finito (Peron et al, 2009), modelo de campo de fase (Hun et al, 2021), entre otros.

3. MÉTODOS DE MITIGACION DEL CRACKING MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ADITIVOS TRADICIONALES

Los métodos de mitigación para el agrietamiento por desecación de suelos están fundamentados principalmente por procesos de estabilización de estos, que mejoran sus propiedades volumétricas, mecánicas y expansivas del suelo. La estabilización se puede dividir en tres categorías principales, cada una aplicable según las propiedades iniciales del suelo a mejorar y la función de la estructura que se soportará en el suelo: la estabilización física, que consiste en el mejoramiento de suelos mediante la intervención en alguna de sus propiedades a fin de aportarle características estructurales nuevas. Dentro de esta categoría se encuentran procedimientos como geosintéticos, geomallas,



geomembranas y mezcla suelos distintos (Liu et al., 2011). La estabilización química implica la adición de sustancias químicas para incidir en el mejoramiento de propiedades como la plasticidad y el potencial de expansión-contracción. Por último, la estabilización mecánica trata del mejoramiento de las propiedades de ingeniería de los suelos por medio de procedimientos mecánicos y sin adición de sustancias químicas; un ejemplo de ello es la compactación, blastings, precarga, etc. (Das, 2015).

Sin embargo, Nitinchandra y Arshad (2019), estudiaron a profundidad los procesos de estabilización del suelo y mitigación de grietas mediante la revisión de la literatura sobre el tema, llegando a dividir la estabilización química en tres grandes grupos: estabilizadores tradicionales (cal, cemento y cenizas volantes), estabilizadores de subproductos (como escorias granuladas de alto horno, polvos de lodo, cenizas de lodos, micro-sílice), y estabilizadores no tradicionales (polímeros, enzimas, otros productos químicos). Similarmente, los métodos de mitigación pueden agruparse en eliminación y sustitución del suelo, acondicionamiento de la humedad y control de la compactación, pre humectación, aplicación de aditivos químicos, alternativas de control de humedad y métodos innovadores.

3.1. ESTABILIZACIÓN CON CAL

Uno de los métodos más empleados en la ingeniería para la estabilización de suelos consiste en la aplicación de cal para reducir el potencial de contracción y también aumenta la rigidez del suelo, propiedad que incrementa el esfuerzo de tracción generado inducido por las restricciones de deformación. Poncelet y Francois (2019) probaron la incidencia de la adición de cal mediante un estudio de un suelo limo-arcilloso (CL), que en primera medida fue caracterizado con sus propiedades índices: 33,6% de límite líquido e índice de plasticidad (IP) 14,8%.

Para la preparación de las muestras, se mezcla el suelo no tratado con agua hasta obtener una humedad del 16%, y el tratado (adición de cal equivalente al 2% de la masa de suelo seca) hasta una humedad del 21%; esta última muestra, pierde aproximadamente un 1,7% del contenido de humedad hasta alcanzar un contenido de agua inicial previsto de 19,8%. Luego, las muestras de suelo se sellan en un recipiente durante una hora, previo a ser compactadas manualmente por amasado, y encajadas en un molde de CBR (15,24 cm de diámetro y 12,7 cm de altura). Las fueron compactadas y extraídas de dos formas distintas para distintos ensayos: Muestras rectangulares (para ensayos de desecación)

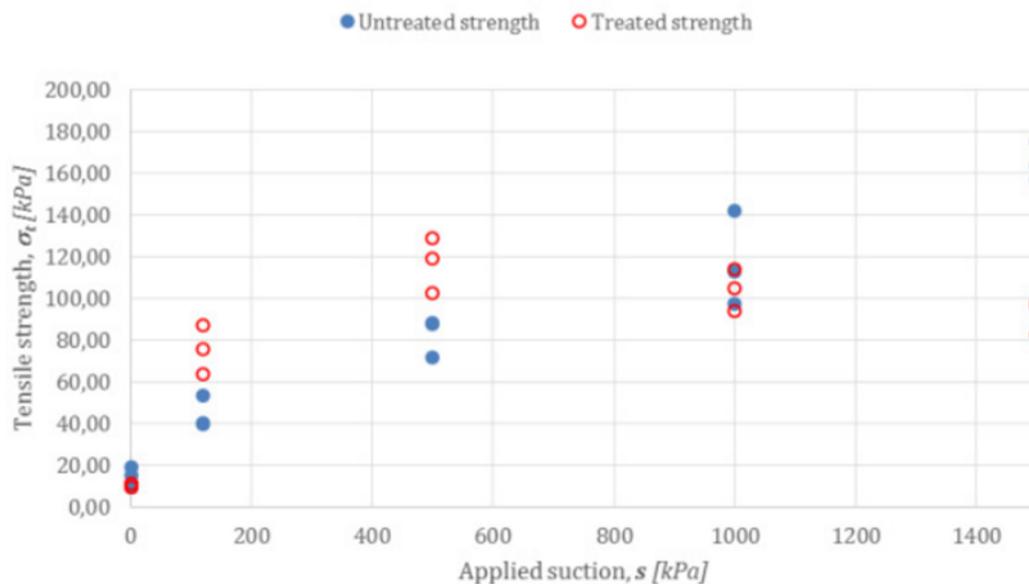


y muestras cilíndricas (para ensayo de tracción directa y compresión uniáxica). Los resultados sugieren lo siguiente:

- **Resistencia a la tracción/compresión:** Determinada a partir de los ensayos de tracción indirecta, se muestra directamente influenciada por el tratamiento con cal y la succión. La Figura 14 muestra la evolución de la resistencia a la tracción en función de la succión aplicada, para muestras tratadas (después de 7 días de curado) y no tratadas. Como se esperaba, la resistencia a la tracción aumenta con la succión en el caso de las muestras no tratadas. Sin embargo, este no es el caso de las muestras tratadas, en las que la resistencia a la tracción oscila en torno a los 90 kPa, excepto en el caso de las muestras saturadas, que presentan una resistencia a la tracción mucho menor. Esto reduce las probabilidades del agrietamiento del suelo, teniendo en cuenta que las tensiones generadas por la succión no alcanzan la resistencia a la tracción total del suelo.

En cuanto a la resistencia a la compresión, el suelo no presentó variaciones con el tratamiento con cal, presentando así la misma resistencia que con el suelo sin tratar.

Figura 14. Gráfico de resistencia a la tracción vs succión aplicada en suelos tratados y no tratados.

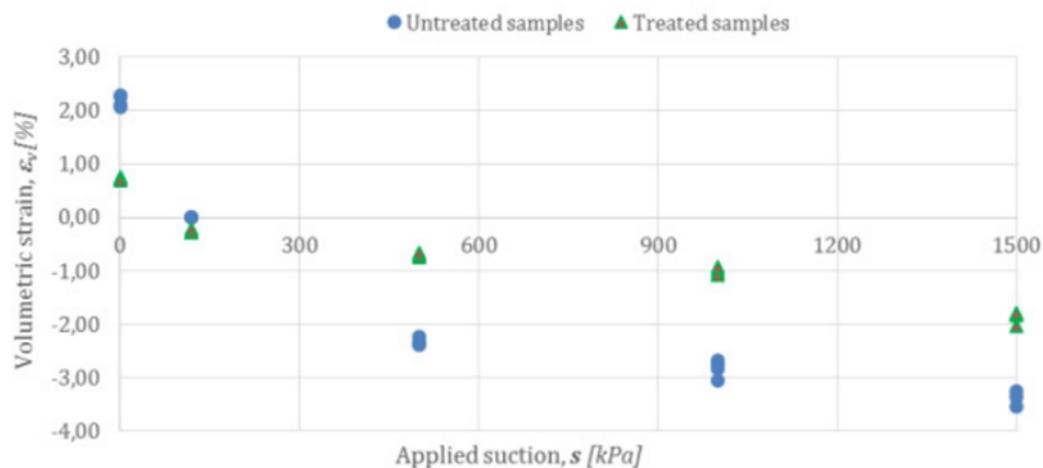


Fuente: Poncelet y Francois (2019)



- **Contracción libre:** Los cambios volumétricos se midieron mediante un escáner 3D, tomando un registro del volumen de la muestra antes y después de la succión tanto para suelos tratados y no tratados (con muestras cilíndricas y rectangulares). Los resultados presentados en la Figura 15, evidencian que el tratamiento con cal reduce significativamente las variaciones de volumen (hinchazón o contracción).

Figura 15. Gráfico de variación de volumen vs succión aplicada en suelos tratados y no tratados.



Fuente: Poncelet y Francois (2019)

- **Contracción restringida:** Para el estudio de este parámetro, la deformación se restringe con una pantalla bidimensional y unos pinos en la parte superior de la muestra durante el proceso de succión. Los resultados indican que para el valor de 1.000 Kilopascales (kPa) existe formación de la grieta inicial para la muestra de suelo sin tratar, mientras que la muestra estabilizada con cal muestra su grieta inicial en el valor de succión igual a 1.500 kPa.



Tabla 6. Resultados de observación visual de grietas (N: No presenta grietas; S: Presenta grietas).

Succión aplicada	Tratamiento	
	No tratado	Tratado
0 kPa	N	N
Compactado	N	N
500 kPa	N	N
1000 kPa	S	N
1500 kPa	-	S

Fuente: Poncelet y Francois (2019)

Aunque los resultados de la estabilización de suelos con cal y su acción en la mitigación de grietas en suelos arcillosos han sido favorables, es cuestionado en el ámbito ambiental, teniendo en cuenta que la producción de cal genera contaminación por la emisión de gases de efecto invernadero (mayormente dióxido de carbono). Por tal razón, se ha iniciado el estudio con otros materiales alternativos, en combinación con cal como activador alcalino. Wanare et al. (2022) realizaron un estudio para la mitigación de grietas en un suelo marino con la aplicación de escoria ultrafina (activada alcalinamente con cal). La realización del estudio constó en primera medida de la caracterización de propiedades de índice del suelo, obteniendo el límite líquido en el 69% y el plástico en el 36%, además, el límite de contracción fue del 23%. El suelo fue clasificado como limos inorgánicos con contenido de arcilla de alta plasticidad. Además, la preparación del suelo constó de tres muestras representativas para las siguientes proporciones de suelo estabilizado:

Tabla 7. Combinación de mezclas de suelo con sus respectivas proporciones.

Combinación de mezcla de suelo	Proporciones (%)
Suelo + escoria ultrafina	97,5:2,5
	95: 5
	92.5: 7.5
	90: 10
	80:20
	70:30
	60:40
Suelo + escoria ultrafina + Cal	95: 4 + 1
	90: 9 + 1
	80: 19 + 1



	70: 29+,1
	60: 39 + 1
Suelo + escoria ultrafina + cemento	95: 4.5 + 0.5
	90: 9.5 + 0.5
	80: 19.5 + 0.5
	70: 29.5 + 0.5
	60: 39.5 + 0.5

Fuente: Wanare et al. (2022)

El método para el estudio de grietas por desecación usado por los autores consistió en la preparación del suelo mediante humectación, para ser ubicado en una placa Petri bajo dos condiciones de contorno: contracción libre (con una capa de grasa en la parte superior e inferior de la placa Petri) y contracción restringida (sin capa de grasa). Las mezclas de suelo fueron sometidas a ciclos de humectación y secado, mientras que se obtenían imágenes en tiempo real con el uso de una cámara para el monitoreo de formación de grietas y su caracterización geométrica. Los parámetros usados para la caracterización fueron los siguientes:

$$CSIF = \frac{A_{cs}}{A_t} \quad (1)$$

CSIF es factor de intensidad de contracción. Donde A_{cs} es el área de grieta en la condición de contracción restringida; A_t es el área total de la muestra de suelo.

$$SIF = \frac{A_s}{A_t} \quad (2)$$

Donde A_s es el área de grieta en la condición de contracción libre. Observamos que con el cálculo de CSIF y SIF se puede establecer la relación CSIR calculada de la siguiente forma:

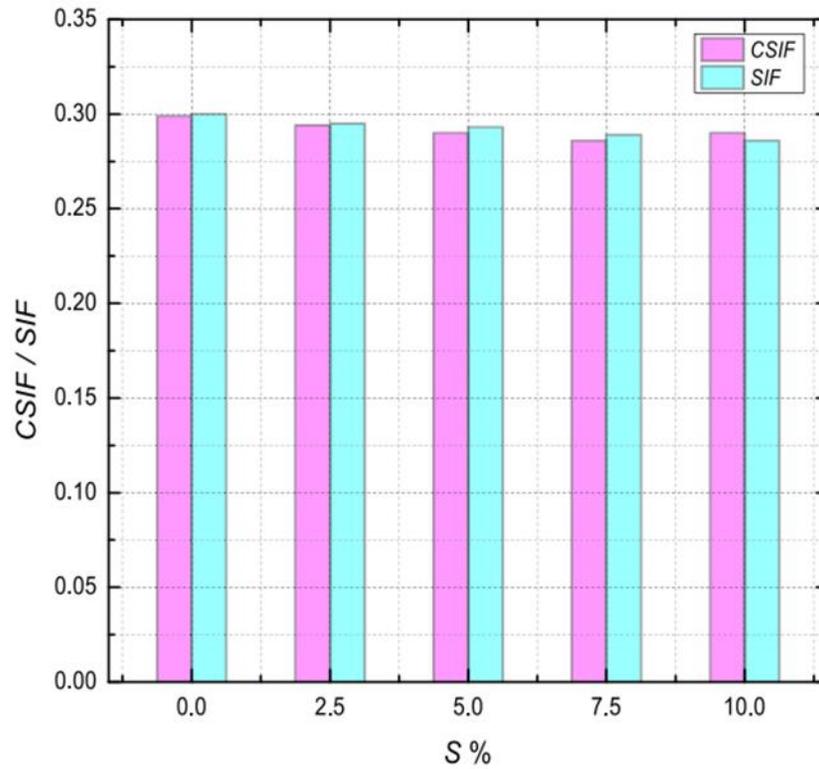
$$CSIR = \frac{CSIF(\text{Suelo sin estabilizar})}{CSIF(\text{Suelo estabilizado})} \quad (3)$$

$$SIR = \frac{SIF(\text{Suelo sin estabilizar})}{SIF(\text{Suelo estabilizado})} \quad (4)$$



Los resultados obtenidos de cada uno de los parámetros se agruparon en dos grandes grupos: mezclas de suelo con porcentajes de adición del 0-10% de escoria ultrafina, y mezclas de suelo con porcentajes de adición de escorial ultra-fina entre 0-10%, cal y cemento.

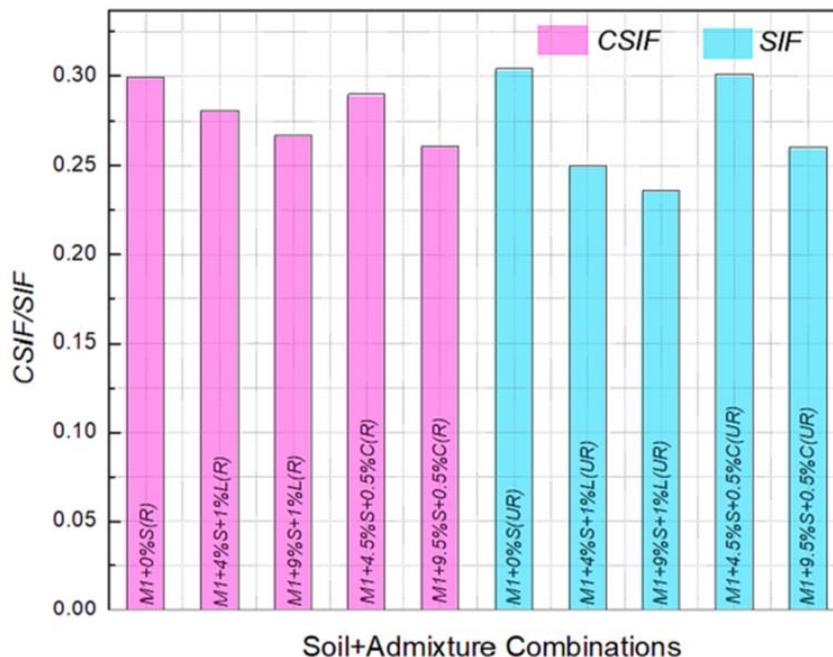
Figura 16. Gráfico de variación de volumen vs succión aplicada en suelos tratados y no tratados.



Fuente: Wanare et al. (2022)



Figura 17. Valores de CSIF y SIF para mezcla de suelo con porcentajes de hasta 10% de adición de escoria ultrafina, cal y cemento.

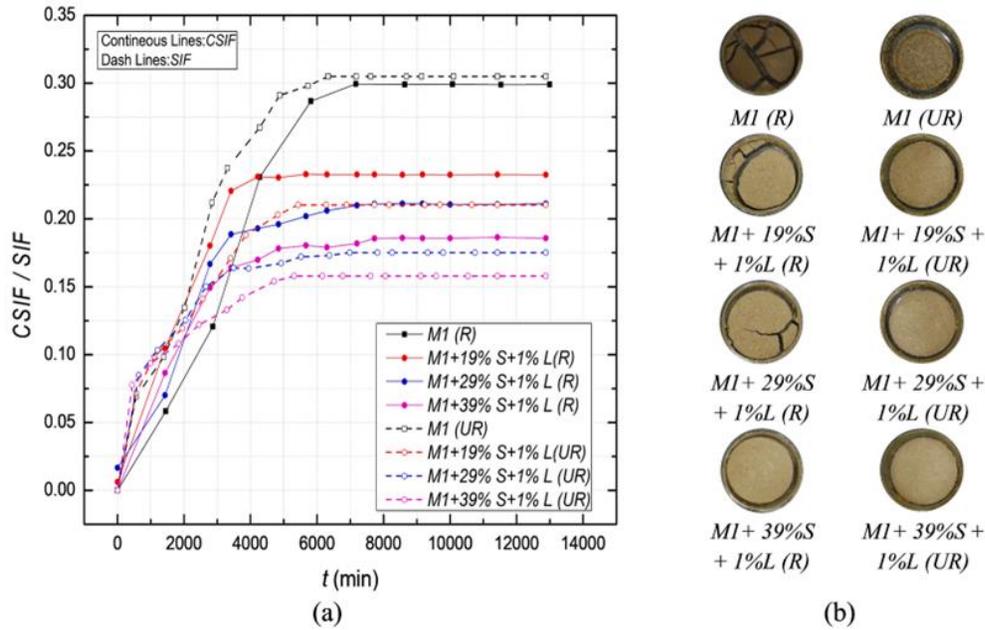


Fuente: Wanare et al. (2022)

La Figura 16, no muestra variación significativa entre el valor de intensidad de contracción para ninguna de las dos condiciones, lo que sugiere que con un reemplazo del 10%, sin activadores alcalinos, no se obtienen resultados favorables que signifiquen un mejoramiento en las propiedades expansivas del suelo. No obstante, se puede incidir de la figura 17, que ambos aditivos secundarios (cal y cemento) influyeron positivamente en el factor de intensidad de contracción debido a que lo disminuyeron hasta en un 20% (mezcla de suelo M1 + 9% de escoria ultrafina + 1% de cal). Visualmente, el efecto de los activadores alcalinos en el ensayo significa una menor presencia de grietas superficiales ante ciclos de humectación-secado.

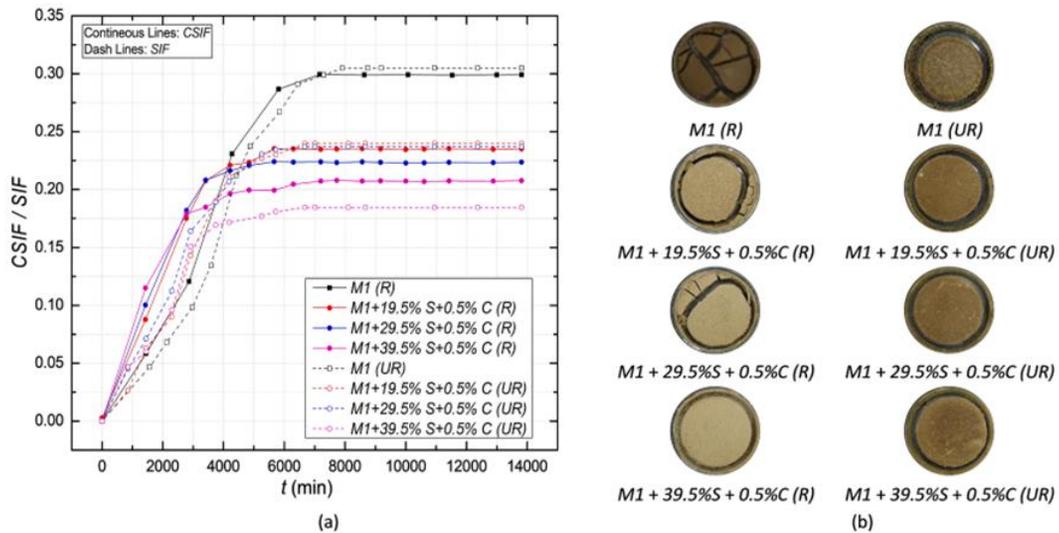
El análisis previo a la realización de ensayos de Wanare et al (2022), indicó que la adición de escoria ultrafina con proporciones mayores al 10% resultaba, en algunos casos, beneficiosas para la mitigación de grietas por desecación en el suelo. Por ello realizaron la misma prueba con porcentajes entre el 20%-40% de adición, manteniendo el porcentaje de aditivo secundario (activador de cal o cemento) entre el 0,5-1%. En este caso, midieron la variación del factor de intensidad con el tiempo, y compararon el registro fotográfico de grietas y contracción final para cada una de las muestras.

Figura 18. (a) Variación de factor de intensidad de contracción con el tiempo (b) Grietas finales por desecación de cada mezcla de suelo.



Fuente: Wanare et al. (2022)

Figura 19. (a) Variación de factor de intensidad de contracción con el tiempo (b) Grietas finales por desecación de cada mezcla de suelo.



Fuente: Wanare et al. (2022)

En las figuras 18 y 19, se puede observar que los valores de factor de intensidad de contracción son mayores para la mezcla de suelos con aplicación de aditivos en la etapa inicial (de cero a dos mil



minutos). Esto se explica principalmente en la hidratación asociada a la cementación que sufren las mezclas de suelo con la aplicación de aditivos, fenómeno sobre el que incide directamente la reacción puzolánica de la escoria y los aditivos secundarios, con el suelo y el agua. Ahora, la aceleración de la contracción debido a los anteriores fenómenos resulta finalmente en mantener valores constantes de intensidad de contracción a un tiempo menor (entre 3.300 y 5.500 minutos) que los suelos estabilizados, que fija sus valores de contracción alrededor de los 5.500 y 7.000 minutos. Esto se ve reflejado en la formación de grietas, que para las muestras con menor porcentaje de adición fue más agresiva que en las mezclas con mayor adición, siendo un contenido de estabilizador del 40% el que logra una mitigación completa del agrietamiento del suelo.

Wanare et al. (2022) explica que el agrietamiento resulta en el deterioro de las propiedades del suelo, acelerando la infiltración del agua, aumentando los asentamientos y reduciendo la resistencia del suelo. Se estudió en el artículo el comportamiento de agrietamiento y retracción de un suelo fino de origen marino adicionando escoria, combinada con cal y cemento en proporciones peso/peso. Los autores adicionaron hasta 39,5% de escoria y 1% de cal y 0,5% de cemento, creando 15 combinaciones donde fueron restringidos y no restringidos el proceso de agrietamiento y retracción en el suelo. Los resultados que fueron encontrados indican que 19,5% escoria y 0,5% cemento fue la combinación óptima para mitigar el agrietamiento/retracción en el suelo estudiado.

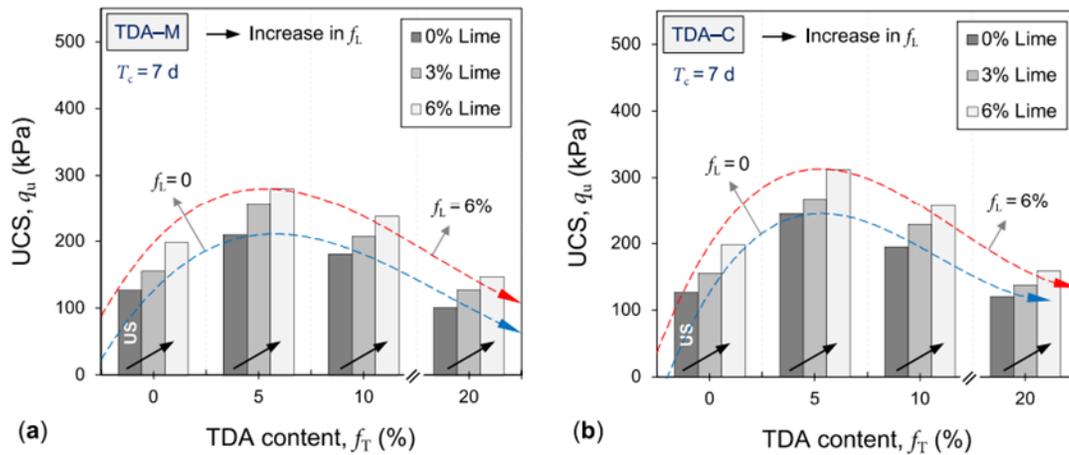
Fue concluido en este estudio que en el proceso de estabilización se debe tener certeza que la resistencia a la tracción siempre debe ser mayor que la tensión de tracción para prevenir el formato del agrietamiento.

Paralelo al estudio de Wanare et al (2022), se han realizado estudios de mitigación de agrietamiento de suelos con aditivos alternativos, que en su mayoría son inertes y no ofrecen reacciones químicas de mejoramiento en su combinación con el suelo, por lo que necesitan un activador como aditivo secundario, siendo este la cal hidratada. El estudio realizado por Soltani et al (2022), evidencia la eficacia combinada de la aplicación de áridos derivados de llantas (TDA) y cal sobre la compactibilidad, resistencia a la compresión y expansión de un suelo arcilloso de Kilkenny, Australia. Las propiedades de índice de dicho suelo fueron las siguientes: 44% límite líquido, 22% límite plástico, e índice plástico de 22%. La expansividad del suelo fue caracterizada por potencial de hinchamiento, obteniendo un valor de 7,6 que lo catalogó como altamente expansivo.



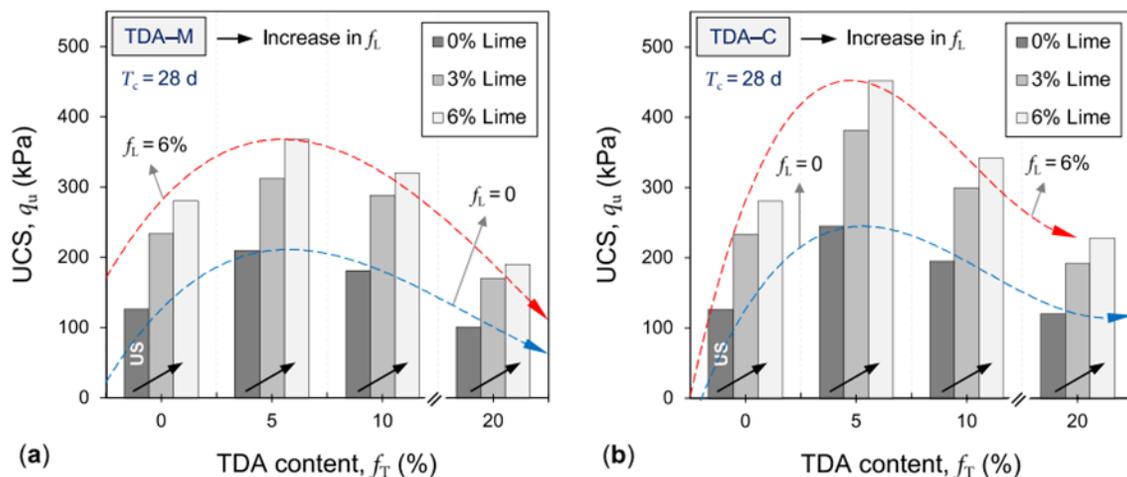
En la Figura 20 y 21, los resultados de compresión indican que el reemplazo de TDA con un 6% de cal potenciaría la propiedad mecánica referente a la resistencia a la compresión inconfiada del suelo, ya que el gráfico de barras para cada tiempo de curado y tipo de gradación proyecta una gráfica de subida inicial hasta un pico (en el cual la adición sobre el suelo es del 5%) para posteriormente disminuir la resistencia a la compresión durante el aumento de contenido de TDA.

Figura 20. Gráfico de q vs contenido de TDA con 7 días de curado.



Fuente: Soltani et al. (2022)

Figura 21. Gráfico de q vs contenido de TDA con 28 días de curado.



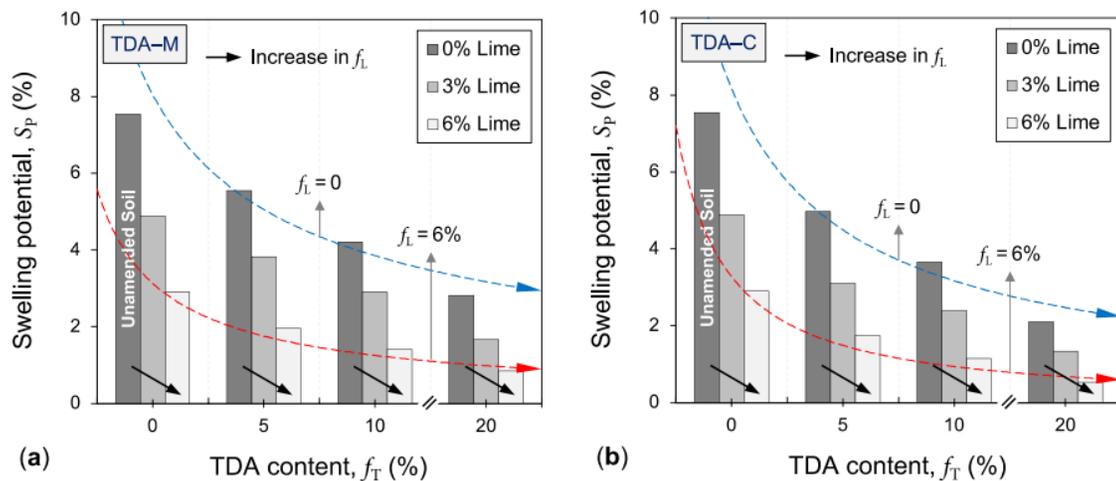
Fuente: Soltani et al. (2022)

El aumento de la compresión en un porcentaje del 5%, se le atribuye, según Soltani y autores (2022), a procesos de intercambio catiónico y floculación-aglomeración a corto plazo, así como las



reacciones puzolánicas a largo plazo (o que dependen del curado) y el efecto “arqueo” desarrollados dentro de las inclusiones de TDA e incrustada dentro de las aglomeraciones. En la figura 22 podemos notar que estos mismos fenómenos, son los causantes de la reducción del potencial de hinchamiento (S_p) que se presenta con el aumento del contenido de TDA en la muestra de suelo. El potencial de hinchamiento resultó mantener una relación directamente proporcional, en la que disminuía exponencialmente este coeficiente con el aumento del contenido de TDA, llegando a reducir (con un porcentaje de cal del 6%) hasta en un 75% aproximadamente el potencial de hinchamiento.

Figura 22. (a) Contenido de TDA-M vs potencial hinchamiento. (b) Contenido de TDA-C vs potencial de hinchamiento.



Fuente: Soltani et al. (2022)

Se deduce del estudio de Soltani et al (2022), que con el contenido de TDA aplicado al suelo, disminuye el potencial de hinchamiento, que pasa de altamente expansivo (suelo inicial) a baja expansividad, con un valor del 0,4% aproximadamente (valor correspondiente a la aplicación de aditivo TDA-C en un 20% de la masa seca del suelo, y 6% del peso total de TDA). El fenómeno de reducción de hinchamiento obedece al reemplazo de contenido arcilla activa (Caolinita y Mortmorillonita), por partículas hidrofóbicas de TDA. También, es atribuible a la fricción interfacial resistiva desarrollada entre los componentes del suelo, la cal y TDA; es decir, cuanto mayor sea el número de partículas de TDA incluidas en la muestra de suelo, mayor será el número de puntos de contacto desarrollado entre las aglomeraciones de suelo-cal y TDA, por lo que es mucho más significativa la resistencia friccional generada en el hinchamiento efectivo. Esto equivale a que el



esfuerzo sufra menos presiones de succión debido al cambio volumétrico, reduciendo la probabilidad de formación de grietas a causa de la variación del volumen del suelo.

3.2. ESTABILIZACIÓN CON CENIZAS VOLANTES (FA)

El origen de las cenizas volantes proviene del proceso de precipitación electrostática, a temperaturas entre 1200-1700 °C. Este tipo de partículas se pueden clasificar de varias formas, pero la tipología más usada en el medio constructivo es aquella realizada por la ASTM, que distingue entre cenizas tipo C y F, según las cantidades de compuestos que contienen. La cantidad de Sílice en las cenizas tipo C es menor con respecto a las cenizas F, pero contienen mayor óxido de calcio, que desencadena la reacción puzolánica sin ningún tipo de activador (Zimar et al., 2022).

En este orden de ideas, se ha comprobado que la incidencia de las cenizas volantes en la estabilización de suelos se lleva a cabo mediante dos procesos: la actividad puzolánica, y el intercambio catiónico.

De igual forma, existen otros métodos alternativos que no contemplan el uso de cal, y buscan reducir la huella de carbono, disminuyendo la carga ambiental que generan los estabilizantes tradicionales. El uso de cenizas volante es una de las alternativas utilizadas, puesto que son un producto (residuo) de la combustión de carbón en centrales térmicas, lo que le confiere propiedades cementantes y un ángulo de fricción que permite mejorar la rigidez y propiedades mecánicas de los suelos estabilizados. No obstante, el potencial de mejoramiento de las cenizas volantes puede aumentar con la combinación de otros materiales, como geo-polímeros, cáscara de arroz y fibras naturales (Rivera et al., 2020).

Las cenizas volantes (FA, por sus siglas en inglés: Fly Ash) está constituido principalmente por sílice y alúmina, y puede clasificarse en dos tipos según la sociedad estadounidense de pruebas y materiales: Clase F, producto de la calcinación de antracita o carbón bituminoso, que se caracteriza por contener una proporción mayor al 20% de óxido de calcio (CaO) y un contenido de la suma de óxido de aluminio, silicio, y hierro (III), entre un 50%-70%; por el contrario, Clase C, contiene una proporción menor al 10% de cal, y mayores proporciones de óxido de aluminio, silicio y hierro (III) mayor al 70% (Dharmendra & Sujit, 2022).

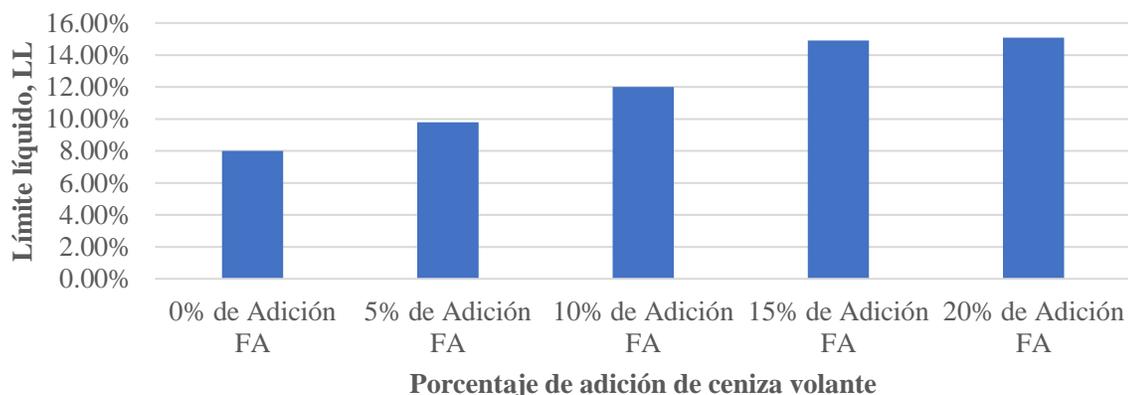


La acción de las cenizas volantes (FA) sobre el suelo estabilizado se produce mediante la reacción entre el compuesto químico, agua y suelo, formando compuestos cementantes que mejoran la resistencia del suelo a través del tiempo. En cambio, las cenizas clase F, ofrece la cementación en proximidad de un activador como la cal y el cemento (Deepak et al., 2018). Generalmente, los usos para la estabilización de suelos mediante cenizas volantes son los siguientes: como agente de secado, debido al consumo de agua que representa la adición del producto; control de la inestabilidad del volumen; y mejora de la resistencia (Dharmendra & Sujit, 2022).

En este orden de ideas, se ha hecho uso de la aplicación de cenizas volantes para suelos expansivos como el suelo de algodón negro, caracterizado por ser una arcilla orgánica de media a alta compresibilidad y alto contenido de montmorillonita (mineral expansivo). En las figuras 23 y 24 se comprobó, mediante ensayos de peso específico, proctor, unidad de compactación y CBR, que, con el aumento de cenizas volantes en este tipo de suelos, se aumentaban los valores de límite líquido e índice plástico, resultando en un suelo estabilizado con menor sensibilidad a los cambios de humedad: sin variación volumétrica apreciable, y sin desmoronarse ni agrietarse.

Paralelamente, se comprobó en la Figura 25, que el potencial de hinchamiento libre disminuye linealmente con respecto al porcentaje de adición de cenizas volantes, aunque, con un porcentaje de adición mayor al 10%, se afecta directamente a las propiedades mecánicas como el CBR y la resistencia a la compresión, disminuyéndolas hasta en un 42% aproximadamente (Gireesh & Harika, 2021).

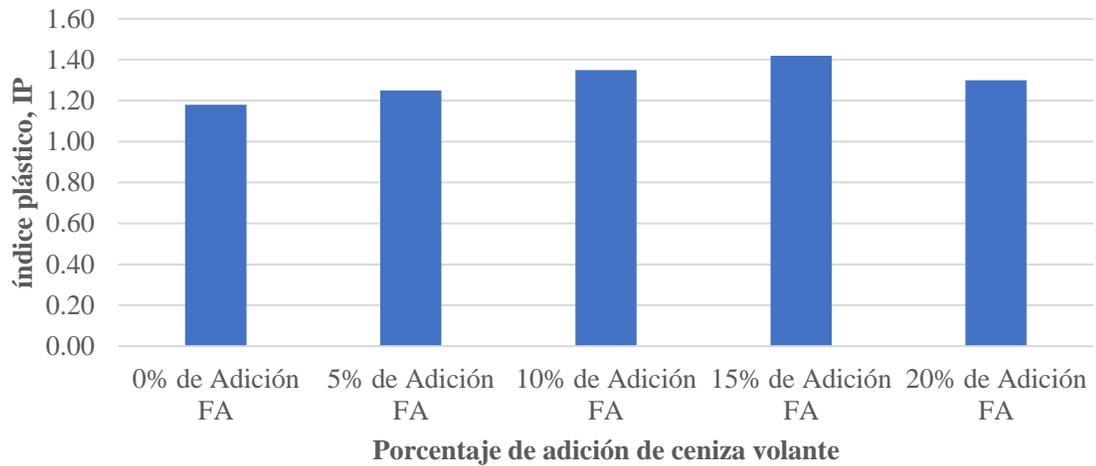
Figura 23. Limite líquido del suelo estabilizado con cenizas volantes vs Adiciones de cenizas volantes.



Fuente: Gireesh & Harika, (2021)

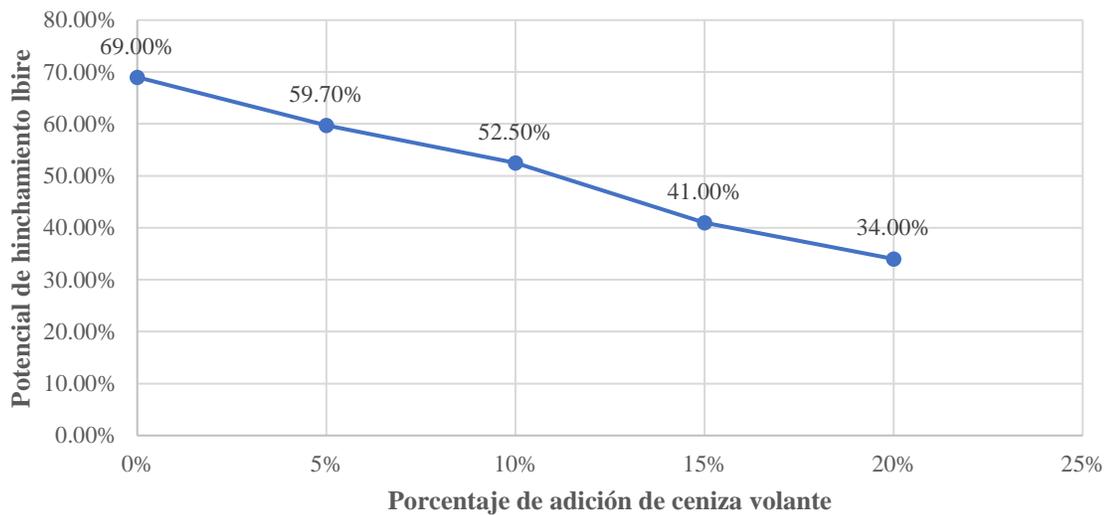


Figura 24. Índice plástico del suelo estabilizado con cenizas volantes vs Adiciones de cenizas volantes.



Fuente: Gireesh & Harika, (2021)

Figura 25. Potencial de hinchamiento vs Adiciones de FA.



Fuente: Gireesh & Harika, (2021)

Entonces, la literatura investigada concluye que la estabilización mediante la adición de cenizas volantes en suelos con arcillas expansivas causa los siguientes resultados: disminución de volumen de poros, índice de plasticidad y variación de la densidad seca máxima; aumento en



propiedades como resistencia a la compresión no confinada, mejoramiento de relación de carga uniforme de California (CBR), y módulo resiliente; y mejoramiento en características hidráulicas como la dilatación y contracción en suelos.

3.3. ESTABILIZACIÓN CON POLÍMEROS (POLIURETANO, POLIETILENO, POLIPROPILENO, NYLON)

También, se ha realizado el estudio de compuestos químicos como polímeros para la estabilización de arcillas, que mejoran las propiedades de esta mediante el efecto de nanocompuestos/nanorellenos construidos a través de los poros internos de la masa de suelo. Básicamente, la adición de polímeros modifica la microestructura de las arcillas mediante la construcción de nanocompuestos dentro de los poros interconectados de las mismas. El efecto beneficioso de la aplicación de este tipo de aditivos aplica para propiedades como la densidad seca (contenido óptimo de humedad), cohesión aparente, índice de plasticidad, rigidez, índice de compresibilidad e hinchamiento, permeabilidad, deformación por contracción volumétrica e intensidad de grietas (Waseim et al., 2014).

Uno de los polímeros con mayor estudio dentro de la estabilización de suelos y mitigación de grietas es el poliuretano, que se encuentra dentro de la clasificación de termoplásticos, que, cuando se calientan pueden reblandecerse y moldearse a presión. El estudio realizado por López et al (2010), en un suelo expansivo de la ciudad de Querétaro (México), comprobó la influencia del poliuretano en la capacidad de expansión, resistencia, deformación y consistencia del suelo, mediante la adición del polímero en porcentajes del 2%, 4%, 5%, 6%, 8% y 10%, respecto al peso seco del suelo como se evidencia en la Tabla 8. El ensayo de propiedades de índice comprobó que el índice de plasticidad disminuye con el aumento del porcentaje de adición, reduciéndolo hasta en más de un 80% con el porcentaje del 10% de poliuretano. Con esta modificación, al suelo natural (clasificado mediante el sistema de clasificación unificado de suelos como suelo arcilloso de alta compresibilidad presentado en la Figura 26) se le confieren propiedades de limo de baja plasticidad.

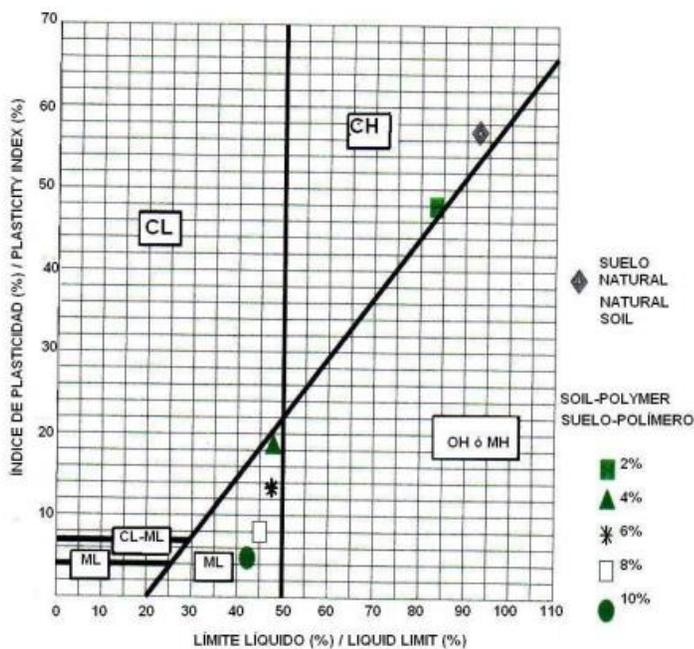


Tabla 8. Influencia de poliuretano mediante la aplicación de polímeros.

Material	Limite líquido, %	Limite plástico, %	Límite de contracción, %	Índice plástico, %
Suelo natural	89,7	36,0	12,5	53,7
Suelo polímero 4%	49,3	28,2	17,9	21,1
Suelo polímero 6%	48,8	36,0	17,7	12,8
Suelo polímero 8%	44,0	38,8	20,7	5,2
Suelo polímero 10%	45,3	37,0	19,5	8,2

Fuente: López et al (2010)

Figura 26. Sistema de clasificación unificado de suelos (Índice plástico vs Limite liquido).

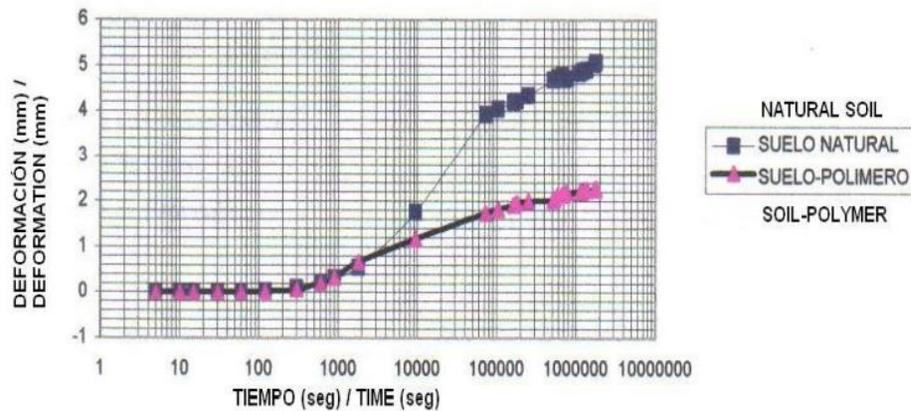


Fuente: López et al (2010)



Los valores de resistencia a la compresión se redujeron en un 30%, pasando de 3,6 kg/cm² a 2,5 kg/cm², valor que sigue siendo suficiente para construcciones ligeras, que son las que frecuentemente son afectadas por la problemática de expansión y agrietamiento de suelo. Por el contrario, en la Figura 27 se muestra que la deformación por expansión se vio beneficiada con la mezcla de suelo polímero, puesto a que su valor máximo disminuyó con respecto a la muestra de suelo en un porcentaje del 43%, siendo la deformación máxima por expansión de la muestra de suelo-polímero de 2,7mm (López et al., 2010).

Figura 27. Deformación máxima por expansión de la muestra de suelo-polímero vs Tiempo.



Fuente: López et al (2010)

Además del poliuretano, se ha demostrado que otros polímeros termoplásticos, como el polietileno Tereftalato, influyen en las propiedades mecánicas y expansivas del suelo, cuando son adicionadas para la estabilización de suelos. En la Figura 28, se notó el resultado de la adición de este tipo de polímeros viéndose reflejado el tipo de falla en las muestras de suelo, sin adición, se obtienen fallas frágiles mientras que con adición (independientemente del porcentaje), las fallas presentadas se caracterizan por ser dúctiles (Hernández & Botero, 2019).



Figura 28. Tipos de falla en la muestra sin fibra de fibra (a) y muestra con 0.1% de fibra (b).



(a) muestra sin fibra de fibra



(b) muestra con 0.1%

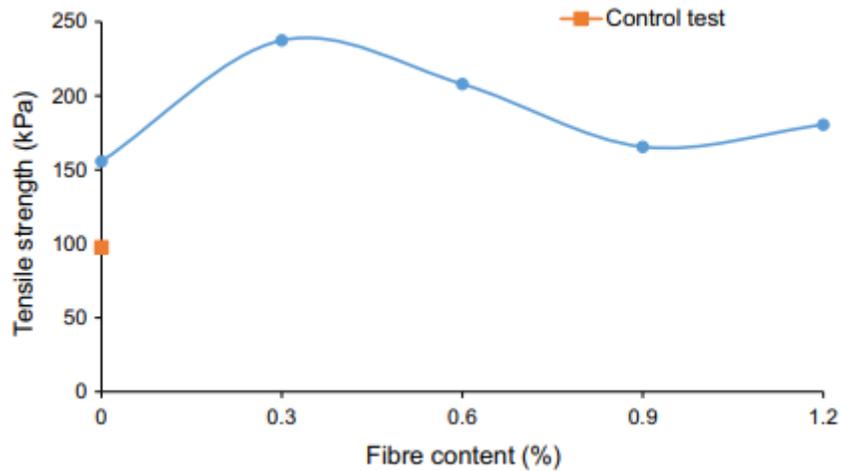
Fuente: Hernández & Botero, 2019

Se ha referenciado entonces, que, aunque el agrietamiento, cambios volumétricos y expansividad han sido correctamente mitigados, la adición de polímeros disminuye valores mecánicos, como la resistencia a la compresión y a la tracción. Este hecho incentivo al estudio de la combinación de polímeros y otros compuestos químicos que beneficien a la mitigación de grietas, aumentando también las propiedades mecánicas.

En este sentido, las enzimas han sido objeto de estudio junto a polímeros, como la fibra de Nylon. En la Figura 29 vemos un ensayo realizado por Xie et al (2020), donde la fibra de Nylon (en un contenido óptimo del 0,6% del peso seco del suelo) con enzimas disminuye los valores de intensidad de agrietamiento (CIF) y aumenta la capacidad de reducción de grietas en la muestra de suelo, aumentando de igual forma la resistencia a la tracción hasta en un 50%.



Figura 29. Contenido de fibra de nylon vs Resistencia a la tracción.



Fuente: Xie et al (2020)

3.3.1. Comportamiento de grietas por desecación en suelos arcillosos reforzados con fibras de polipropileno

Tang et al., (2012) estudiaron la inclusión de fibras bajo dos parámetros: contenido de fibra (f_c : 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, y 0.8%) y longitud de la fibra (f_l : 6, 12 y 9 mm). Los resultados fueron obtenidos mediante una técnica de procesamiento de imágenes para describir cuantitativamente el efecto de la adición de las fibras en las características geométricas y morfológicas de los patrones de grietas. El estudio confirma que la adición de fibras mejora significativamente las propiedades físicas influyentes en la resistencia a la formación de grietas en el suelo, como la cantidad de terrones, que eran inicialmente regulares y separados por segmentos de grieta formados, y posterior al tratamiento fueron tomando formas irregulares debido a que las grietas fueron perdiendo conexión entre sí.

También hubo influencia en valores cuantitativos, como la fisuración superficial, que pasó de un 19,26% a un 11,5% con un refuerzo de fibra de 0,8%. Sin embargo, existen otros parámetros que indican que, al exceder un límite de valor en la adición de fibras, se puede afectar la mezcla de suelo, conllevando por ejemplo la degradación de la muestra. Por ejemplo, la anchura de las



grietas se redujo en un 36% (de 0,22 cm a 0,14 cm) con una adición de fibra igual al 0,05%; con adiciones mayores, no se presentaron resultados beneficiosos. La longitud media de las grietas disminuyó progresivamente con el aumento de la cantidad de fibra, pasando de valores máximos de 1,70 cm a valores mínimos de 0,32 cm. En definitiva, se observa que el parámetro con mayor influencia es la cantidad de fibra de adición, y que la longitud de fibra incide en resultados como el efecto “puente” que permite que la mezcla de suelo tome un comportamiento dúctil y no frágil frente a esfuerzos de tracción excedentes (Tang et al., 2012).

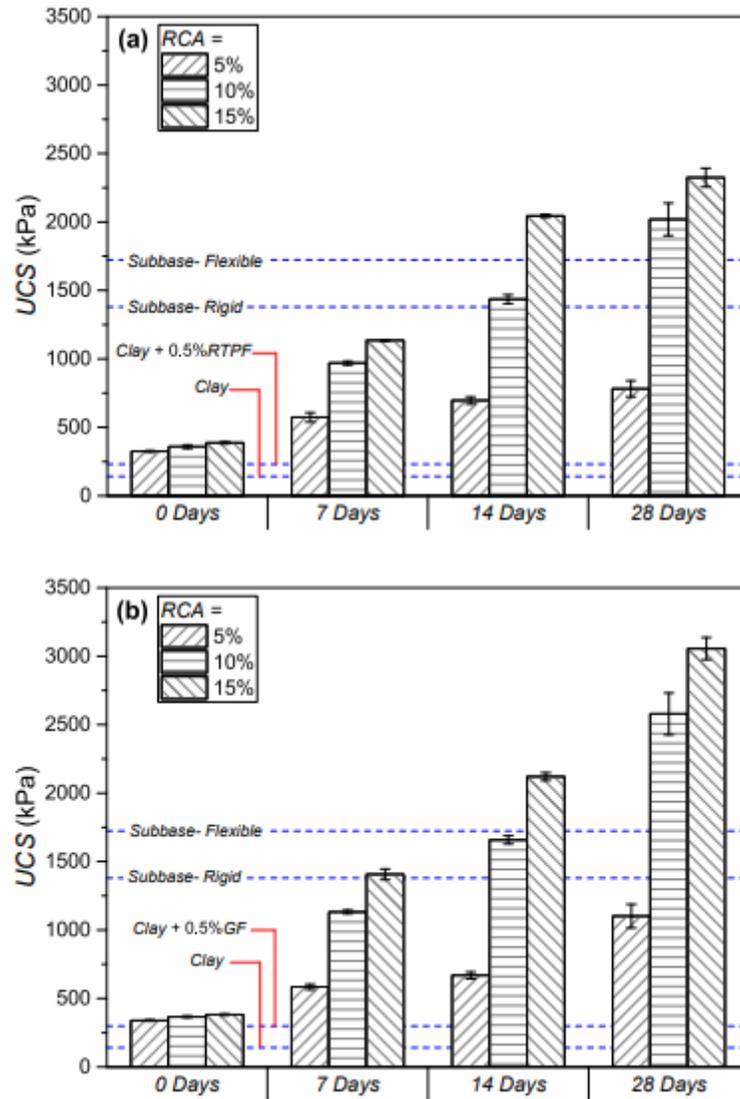
3.4. ESTABILIZACIÓN CON OTROS RESIDUOS DE INDUSTRIAS

Por último, el estudio de residuos de otras industrias ha llamado la atención de la comunidad científica para su aplicación en la estabilización de suelos y mitigación de grietas. Por ejemplo, Piltan et al (2022), realizaron ensayos de compresión no confinada y resistencia a la tracción para evaluar la influencia de la adición de agregados de hormigón reciclado (RCA), fibras de neumático reciclado (RTPFs) y fibras de vidrio (GFs), en las propiedades de un suelo arcilloso de origen aluvial (estabilización fisicoquímica).

En las Figuras 30 y 31 se muestra la resistencia a la tracción inconfiada y tracción indirecta obteniendo su beneficio máximo mediante la adición de un 15% de RCA en una mezcla de suelo-fibra de vidrio, frente a la mezcla de suelo-fibra de residuos de neumático.



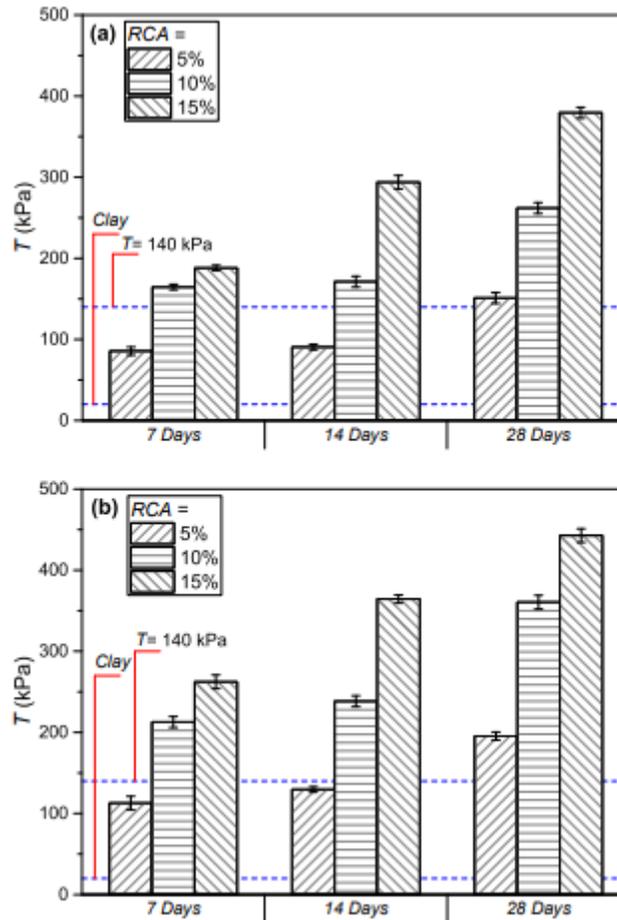
Figura 30. Influencia de la adición de agregados de hormigón reciclado (RCA), fibras de neumático reciclado (RTPFs) y fibras de vidrio (GFs) en las muestras a y b.



Fuente: Piltan et al (2022)



Figura 31. Influencia en la resistencia a la tracción mediante la adición de un 15% de RCA en una mezcla de suelo-fibra de vidrio, frente a la mezcla de suelo-fibra de residuos de neumático en las muestras a y b.



Fuente: Piltan et al. (2022)

El aumento exponencial al agregar hormigón reciclado (RCA) se debe a la reacción química entre la arcilla y los iones de calcio Ca^{+2} , que se intercambian con cationes monovalentes, como el Na^{+} , en la superficie de clivaje de las partículas de arcilla, además de producir la floculación de las partículas de arcillas.

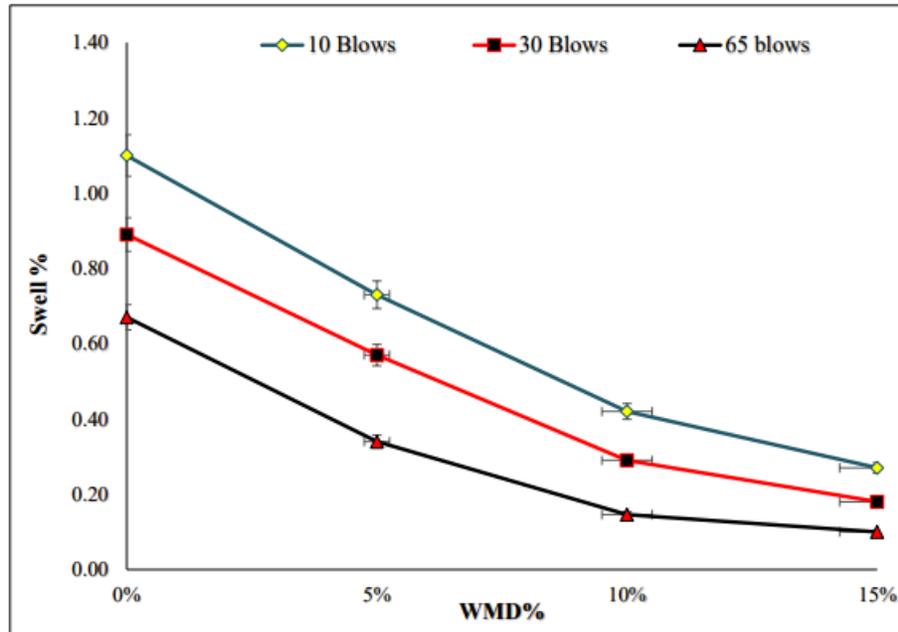
Se ha realizado de igual forma la indagación en residuos de sub-productos de otras industrias, como la cerámica, específicamente en el residuo de mármol. El resultado de las indagaciones ha concluido en que, como los anteriores aditivos, la adición de residuo de mármol disminuye el límite líquido, índice plástico e índice de expansión, además de influir en otras propiedades como la presión de levantamiento del suelo (disminuye), densidad del suelo y propiedades mecánicas (Ali & Khan,



2012). Por medio de ensayos de compresión inconfiada, CBR y potencial de hinchamiento, Waheed et al. (2021) determinaron la influencia de la adición de residuos de mármol (en un porcentaje de 0, 5, 10 y 15% como se evidencia en la Figura 32) en un suelo colapsable de una región semiárida en el norte de Pakistán. Los autores concluyeron en que el porcentaje óptimo de adición de polvo de residuo de mármol es de un 10%, teniendo en cuenta que, con este porcentaje mejoraron todas las propiedades de suelo evaluadas: la resistencia a la compresión inconfiada aumentó en un 100%, pasando de 101,1 kN/m² a 202,1 kN/m² aproximadamente; el potencial de hinchamiento disminuyó hasta un valor del 0,3%, frente a la muestra de suelo virgen, que era de 0,90%, lo que resulta beneficioso en la reducción de formación de grietas; también aumentó hasta en un 41,18% frente al suelo sin tratamiento.

Por lo que se establece que este método beneficia a la mitigación de agrietamiento de suelos blandos y problemáticos, al mejorar los procesos fisicoquímicos del suelo, incluyendo la mezcla densificación y las reacciones del intercambio catiónico.

Figura 32. Influencia de adición de residuos de mármol en un suelo colapsable de una región semiárida en el norte de Pakistán.



Fuente: Waheed et al. (2021)



3.4.1. Efecto hidrofóbico en la estabilización de suelos para una mejora del suelo de la subrasante

El suelo como soporte estructural para las obras relacionadas con carreteras y pavimentos, es susceptible a tener problemas al ser o estar asentado sobre arcillas expansivas. Uno de los métodos más utilizados en la estabilización química, que sugiere la adición de ciertos elementos que provoquen un efecto Hidrofóbico en el suelo para hacer de este un material insoluble con el agua. Tal es el caso del presente artículo, en el que hace uso de calcita hidrofóbica en varios porcentajes de adición a la capa subrasante de suelo, y un 5% de cemento portland ordinario (Ezreig et al., 2022).

El resultado del experimento arrojó que las muestras de suelo estabilizadas con un 5% de cemento portland ordinario y un 7% de calcita hidrofóbica, alcanzó resultados mayores de resistencia a la compresión para curados iguales a noventa días sin remojar. También, concluyeron que existe un aumento significativo en la resistencia a la compresión con una adición de mezcla de calcita-cemento (5%). La estabilización causada se debe a la reacción del agua con otros elementos químicos inherentes al suelo, que absorben el agua durante los primeros días de curado de la estabilización, mejorando además propiedades como la resistencia a la flexión y el CBR.



En la Tabla 9, se representa un resumen de todos los métodos de mitigación del cracking mencionados con anterioridad:

Tabla 9. Tabla resumen de los métodos de mitigación mediante la aplicación de aditivos tradicionales.

Tipo de estabilización	Referencia	Reacciones en la mezcla de suelo	Resultados
Estabilización con cal (como aditivo primario o activador alcalino)	Poncelet & Francois (2019); Wanare et al. (2022); Soltani et al. (2022)	Hidratación asociada a la cementación producida por la aplicación de aditivos, reacciones puzolánicas, intercambio catiónico y floculación-aglomeración de partículas a corto plazo.	Mejoramiento de propiedades de índice, disminución de variación volumétrica (contracción libre), reducción del factor de intensidad de contracción (CSIF), aumento de resistencia a la tracción inconfiada.
Estabilización con cenizas volantes (FA)	Rivera et al. (2020); Dharmendra & Sujit (2022); Deepak et al. (2018); Gireesh & Harika (2021)	Formación de compuestos cementantes mediante la reacción entre FA, suelo y agua, activación alcalina, intercambio catiónico.	Control de variación de volumen, mejoramiento de propiedades de índice, disminución de potencial de hinchamiento libre, disminución leve de la resistencia a la compresión.
Estabilización con Polímeros (poliuretano, polipropileno, nylon)	Waseim et al. (2014); López et al. (2010); Hernández & Botero (2019); Xie et al. (2020)	Formación de nanocompuestos dentro de los poros interconectados de la masa de suelo.	Mejoramiento de propiedades de índice, reducción de potencial de expansión (de alto a bajo), disminución de la deformación por contracción (variación volumétrica) y disminución en las propiedades mecánicas.
Estabilización con otros residuos de industrias (construcción, vidrio, neumáticos)	Piltan et al (2022); Ali & Khan (2012); Waheed et al. (2021)	Intercambio catiónico, densificación, floculación de partículas.	Mejoramiento de propiedades de índice, aumento de las propiedades mecánicas, y disminución del potencial de hinchamiento.

Fuente: Autores, (2022).

4. CONCLUSIONES

A partir del análisis de artículos científicos, artículos de revisión y documentos investigativos de pregrado y posgrado presentados en esta monografía, fue posible obtener conclusiones, que tienen de objetivo ser de utilidad ante futuras investigaciones. De igual forma, las conclusiones están destinadas a aportar una base teórica que permita a profesionales del sector de la construcción, tomar decisiones acertadas acerca de la aplicación de métodos de mitigación de agrietamiento en suelos blandos.

1. El fenómeno del cracking en suelos blandos y problemáticos es una temática de estudio importante para la ingeniería civil, debido a que puede causar el desplome de estructuras construidas en estos suelos. Bajo la presente revisión del estado del arte, se llegó a la conclusión de que los cambios volumétricos son la principal causa que afecta a las edificaciones construidas en suelos blandos, que son producto de factores intrínsecos y extrínsecos del suelo, como su mineralogía, relaciones de peso y humedad, temperatura y ciclos de humectación y secado a los cuales se somete.

2. Los estudios en los que se fundamentó el presente proyecto determinaron que un mayor contenido de montmorillonita e illita en suelos arcillosos representaba mayor expansión volumétrica en ciclos de humectación y secado, debido a la hidrofilia de estos en comparación a otros minerales. Adicional a ello, el contenido de humedad, densidad seca y estructura interfacial, influyen en la contracción del suelo, siendo este último el proceso por el que se inician las grietas al superar el esfuerzo a tracción propio del suelo.

3. La técnica más utilizada para el estudio de agrietamiento es la observación mediante imágenes digitales (CIAS y DIC), que permiten caracterizar las grietas iniciales y secundarias en los procesos de humectación y secado del suelo, además de predecir grietas futuras o a mayor escala, mediante la aproximación estadística y probabilística. El comportamiento patrón de grietas encontradas en los suelos, se basa en una grieta principal de gran espesor a lo largo de las muestras de suelo, y posteriormente, la formación de grietas secundarias, perpendiculares a la grieta principal y con un espesor menor al de la grieta primaria.



4. La estabilización química de suelos es la más eficaz contra el fenómeno de agrietamiento por desecación de suelos. Esto se explica en que la adición de compuestos químicos modifica la microestructura del suelo, e incide directamente sobre las reacciones que se forman cuando el suelo sufre una variación de humedad. Se comprobó que la adición de un solo material, como las cenizas volantes, polímeros, o cal, suelen abatir parcial o totalmente el cracking, pero a su vez, afectan otras funcionalidades del suelo, como sus propiedades mecánicas. Por ello, se sugiere la combinación de dos tipos de aditivos, como la mezcla de RCA y fibras de vidrio molido o fibras de neumático, o de otros tipo de subproductos industriales con cal como activador alcalino, que incidieron de forma positiva en las propiedades de índice, mecánicas y potencial de hinchamiento libre, abatiendo el fenómeno de cracking en los suelos ensayados.

5. La cantidad óptima de material de adición para la mitigación de suelos, varió entre un 10%-15%, porcentajes en los que obtuvieron los mejores resultados. Como por ejemplo la adición de 15% de RCA a una mezcla de suelo-fibra de vidrio, que aumentó en más de un 200% la resistencia a la tracción y compresión inconfiada, o la adición del 10% de mármol a otro tipo de suelo, que disminuyó en un 66% el potencial de hinchamiento.

6. Mediante ensayos de tracción directa y succión, se comprobó que la aplicación de cal aumenta la resistencia a la tracción, lo que representa mayor estabilidad del suelo. La resistencia a la tracción aumenta con la succión en el caso de las muestras no tratadas. Sin embargo, este no es el caso de las muestras tratadas, en las que la resistencia a la tracción oscila en torno a los 90 kPa, excepto en el caso de las muestras saturadas, que presentan una resistencia a la tracción mucho menor.

7. Se encontró evidencia de ensayos de contracción restringida, donde la deformación se restringe con una pantalla bidimensional y unos pinos en la parte superior de la muestra durante el proceso de succión. Los resultados indican que para el valor de 1.000 Kilopascales (kPa) existe formación de la grieta inicial para la muestra de suelo sin tratar, mientras que la muestra estabilizada con cal muestra su grieta inicial en el valor de succión igual a 1.500 kPa.

8. La utilización de escoria ultrafina con proporciones entre el 20%-40% de la masa de seca del suelo, con un porcentaje de aditivo secundario (activador de cal o cemento) entre el 0,5-



1%, disminuyó el factor de intensidad de contracción, que es mayor para la mezcla de suelos con aplicación igual al 10%. Por otra parte, con la adición en porcentajes mayores se logra sosegar la contracción a un tiempo menor (entre 3.300 y 5.500 minutos) que los suelos estabilizados inicialmente (10%), que fija sus valores de contracción alrededor de los 5.500 y 7.000 minutos. Esto se ve reflejado en la formación de grietas, que para las muestras con menor porcentaje de adición fue más agresiva que en las mezclas con mayor adición, siendo un contenido de estabilizador del 40% el que logra una mitigación completa del agrietamiento del suelo.

9. Sobre la influencia de la adición de residuos de mármol (en un porcentaje de 0, 5, 10 y 15%) en un suelo colapsable, se concluyó que su adición óptima es de un 10% ya que con este porcentaje mejoraron todas las propiedades de suelo evaluadas: la resistencia a la compresión confinada aumentó en un 100%, pasando de 101,1 kN/m² a 202,1 kN/m² aproximadamente; el potencial de hinchamiento disminuyó hasta un valor del 0,3%, frente a la muestra de suelo virgen, que era de 0,90%, lo que resulta beneficioso en la reducción de formación de grietas; también aumentó hasta en un 41,18% frente al suelo sin tratamiento.

Teniendo en cuenta que la presente monografía está fundamentada en una revisión de investigaciones, artículos científicos, documentos investigativos de pregrado y posgrado, se recomienda la realización de pruebas experimentales para evaluar el comportamiento mecánico y químico de los suelos vulnerables (mayormente arcillosos) con el objetivo de aplicar el método más efectivo para poder estabilizarlo mediante materiales minerales como la cal, cenizas volantes, polímeros u otros residuos de industrias. En este sentido, se recomienda mezclar gran parte de los suelos arcillosos con arenas u otros elementos que ayuden a aumentar su permeabilidad, con el fin de impedir una excesiva retención de agua y poder convertirse en un tipo de suelo apto para cualquier obra constructiva.

La presente monografía insta al seguimiento de la investigación de las grietas por disecación del suelo, que pueden ser causadas por fenómenos naturales (cambios de clima) o por actividad humana (industrias), al detectar que las grietas no se desarrollan únicamente por fenómenos naturales, como el clima, si no por efectos de industrias, como el caso de República Checa. Además, la importancia de la presente revisión radica en que al concluir que la estabilización química de dos fases (doble aditivo), es la opción óptima para la mitigación de la problemática,



se abre el debate sobre la gama de combinaciones que se pueden realizar para obtener los mejores resultados. Es decir, bajo la línea del presente estudio, se pueden desarrollar ensayos de materiales de adición (combinados) que permitan abatir la condición problemática de un suelo, teniendo en cuenta aspectos ambientales, mecánicos y económicos.

Finalmente, la monografía aporta al medio científico y a la sociedad en general, en una aclaración de las consecuencias que pueden sufrir las diferentes estructuras por los fenómenos de desecación del suelo, razón que suma valor a la importancia de tener un perfil mineralógico de las arcillas sobre las cuales se construyen las edificaciones en el campo de la ingeniería civil.



5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Al-Azzawi, A. A., Daud, K. A., & Abdul Sattar, M. A. (2012). *Effect of silica fume addition on the behavior of silty-clayey soils. Journal of Engineering and Sustainable Development (JEASD)*, 16(1). <https://www.iasj.net/iasj/article/28695>
- Albrecht, B. A., & Benson, C. H. (2001). Effect of desiccation on compacted natural clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(1), 67–75. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1090-0241\(2001\)127:1\(67\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:1(67))
- An, N., Tang, C.-S., Cheng, Q., Wang, D.-Y., & Shi, B. (2020). Application of electrical resistivity method in the characterization of 2D desiccation cracking process of clayey soil. *Engineering Geology*, 265(105416), 105416. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105416>
- Azzam, W. R. (2014). Utilization of polymer stabilization for improvement of clay microstructures. *Applied clay science*, 93–94, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.03.006>
- Baker, R. (1981). Ténsele strength, tension cracks, and stability of slopes. *SOILS AND FOUNDATIONS*, 21(2), 1–17. https://doi.org/10.3208/sandf1972.21.2_1
- Barman, D., & Dash, S. K. (2022). Stabilization of expansive soils using chemical additives: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(4), 1319–1342. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.011>
- Caracol Cartagena. (2021). Ciénaga de la Virgen en Cartagena: seca y sin dolientes. Extraído de: <https://caracol.com.co/2022/10/31/el-fin-del-mundo-y-la-senal-en-el-polo-sur-que-todos-esperaban-que-implica/>
- Cheng, Q., Tang, C.-S., Zeng, H., Zhu, C., An, N., & Shi, B. (2020). Effects of microstructure on desiccation cracking of a compacted soil. *Engineering Geology*, 265(105418), 105418. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105418>



- Deepak, M. S., Rohini, S., Harini, B. S., & Ananthi, G. B. G. (2021). Influence of fly-ash on the engineering characteristics of stabilised clay soil. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2014–2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.497>
- Gerard, P., Murray, I., & Tarantino, A. (2019). Cracking behaviour of fine-grained soils: from laboratory testing to numerical modelling. *E3S web of conferences*, 92, 16004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199216004>
- Gireesh Kumar, P., & Harika, S. (2021). Stabilization of expansive subgrade soil by using fly ash. *Materials Today: Proceedings*, 45, 6558–6562. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.469>
- Le, T.-C., Liu, C., Tang, C.-S., Zhang, X.-Y., & Shi, B. (2022). Numerical simulation of desiccation cracking in clayey soil using a multfield coupling discrete-element model. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002747](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002747)
- Liu, J., Shi, B., Jiang, H., Huang, H., Wang, G., & Kamai, T. (2011). Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*, 117(1–2), 114–120. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.011>
- Lu, Y., Gu, K., Zhang, Y., Tang, C., Shen, Z., & Shi, B. (2021). Impact of biochar on the desiccation cracking behavior of silty clay and its mechanisms. *The Science of the Total Environment*, 794(148608), 148608. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148608>
- Morris, P. H., Graham, J., & Williams, D. J. (1992). Cracking in drying soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 29(2), 263–277. <https://doi.org/10.1139/t92-030>
- Omidi, G. H., Thomas, J. C., & Brown, K. W. (1996). Effect of desiccation cracking on the hydraulic conductivity of a compacted clay liner. *Water, Air, and Soil Pollution*, 89(1–2), 91–103. <https://doi.org/10.1007/bf00300424>



- Pineda, J., & Rueda, Y. (Eds.). (2011). *Patología asociadas a fenómenos de desecación en pavimentos flexibles del occidente de la Sábana de Bogotá*. Research Gate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2618.4402>
- Poncelet, N., & François, B. (2019). Desiccation crack in lime-treated silty clay: Experimental evaluation and constitutive interpretation. *E3S Web of Conferences*, 92, 11002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199211002>
- Rivera, J. F., Aguirre-Guerrero, A., Mejía de Gutiérrez, R., & Orobio, A. (2020). Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión). *Informador técnico*, 84(2), 43–67. <https://doi.org/10.23850/22565035.2530>
- Salimi, K., Cerato, A. B., Vahedifard, F., & Miller, G. A. (2021a). A temperature-dependent model for tensile strength characteristic curve of unsaturated soils. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 28(100244), 100244. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2021.100244>
- Salimi, K., Cerato, A. B., Vahedifard, F., & Miller, G. A. (2021b). Tensile strength of compacted clays during desiccation under elevated temperatures. *Geotechnical Testing Journal*, 44(4), 20200114. <https://doi.org/10.1520/gtj20200114>
- Sánchez Guzmán, J., & Auvinet Guichard, G. (2021). Mejoramiento de terreno afectado por grietas para la cimentación de viviendas de mampostería. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 22(1), 1–9. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.003>
- Shepidchenko, T., Zhang, J., Tang, X., Liu, T., Dong, Z., Zheng, G., & Yang, L. (2020). Experimental study of the main controlling factors of desiccation crack formation from mud to shale. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 194(107414), 107414. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107414>
- Soltani, A., Taheri, A., Deng, A., & O’Kelly, B. C. (2022). Stabilization of a highly expansive soil using waste-tire-derived aggregates and lime treatment. *Case Studies in Construction Materials*, 16(e01133), e01133. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01133>



- Tabatabaie Shourijeh, P., Masoudi Rad, A., Heydari Bahman Bigloo, F., & Binesh, S. M. (2022). Application of recycled concrete aggregates for stabilization of clay reinforced with recycled tire polymer fibers and glass fibers. *Construction and Building Materials*, 355(129172), 129172. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129172>
- Tang, C., Shi, B., Liu, C., Zhao, L., & Wang, B. (2008). Influencing factors of geometrical structure of surface shrinkage cracks in clayey soils. *Engineering Geology*, 101(3–4), 204–217. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.05.005>
- Tang, C.-S., Cui, Y.-J., Tang, A.-M., & Shi, B. (2010). Experiment evidence on the temperature dependence of desiccation cracking behavior of clayey soils. *Engineering Geology*, 114(3–4), 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.003>
- Tang, C.-S., Zhu, C., Cheng, Q., Zeng, H., Xu, J.-J., Tian, B.-G., & Shi, B. (2021). Desiccation cracking of soils: A review of investigation approaches, underlying mechanisms, and influencing factors. *Earth-Science Reviews*, 216(103586), 103586. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103586>
- Tang, C.-S., Zhu, C., Leng, T., Shi, B., Cheng, Q., & Zeng, H. (2019). Three-dimensional characterization of desiccation cracking behavior of compacted clayey soil using X-ray computed tomography. *Engineering Geology*, 255, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.04.014>
- Tornabene, F. (s/f). *Civil Engineering Journal*. Civilejournal.org. Recuperado el 4 de noviembre de 2022, de <https://www.civilejournal.org/index.php/cej>
- Vogel, H.-J., Hoffmann, H., Leopold, A., & Roth, K. (2005). Studies of crack dynamics in clay soil. *Geoderma*, 125(3–4), 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.07.008>
- Wanare, R., Jayanthi, P., & Iyer, K. K. R. (2022). A study on cracking behavior of marine soil modified with ultrafine slag under cured and uncured conditions. *Materials Today: Proceedings*, 65, 662–668. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.235>



- Xu, J.-J., Tang, C.-S., Cheng, Q., Xu, Q.-L., Inyang, H. I., Lin, Z.-Y., & Shi, B. (2022). Investigation on desiccation cracking behavior of clayey soils with a perspective of fracture mechanics: a review. *Journal of Soils and Sediments*, 22(3), 859–888. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03082-y>
- Zeng, H., Tang, C.-S., Cheng, Q., Inyang, H. I., Rong, D.-Z., Lin, L., & Shi, B. (2019). Coupling effects of interfacial friction and layer thickness on soil desiccation cracking behavior. *Engineering Geology*, 260(105220), 105220. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105220>
- Xie, Y., Costa, S., Zhou, L., & Kandra, H. (2020). Mitigation of desiccation cracks in clay using fibre and enzyme. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(8), 4429–4440. <https://doi.org/10.1007/s10064-020-01836-5>
- Yilmaz, I., Marschalko, M., Lamich, D., Drusa, M., Machačík, J., Heviánková, S., Kyncl, M., Lacková, E., Bestová, I., Krčmář, D., Stutz, E., & Bednárik, M. (2014). Monitoring of heat transmission from buildings into geological environment and evaluation of soil deformation consequences in foundation engineering. *Environmental Earth Sciences*, 72(8), 2947–2955. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3200-2>
- Zeng, H., Tang, C.-S., Cheng, Q., Zhu, C., Yin, L.-Y., & Shi, B. (2020). Drought-induced soil desiccation cracking behavior with consideration of basal friction and layer thickness. *Water Resources Research*, 56(7). <https://doi.org/10.1029/2019wr026948>
- Zeng, H., Tang, C.-S., Zhu, C., Cheng, Q., Lin, Z.-Z., & Shi, B. (2022). Investigating soil desiccation cracking using an infrared thermal imaging technique. *Water Resources Research*, 58(1). <https://doi.org/10.1029/2021wr030916>
- Zeng, H., Tang, C.-S., Cheng, Q., Zhu, C., Lin, Z.-Z., Yin, L.-Y., & Shi, B. (2022). Desiccation-induced curling of mud layers: Field observations and experimental insights. *Engineering Geology*, 296(106458), 106458. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106458>