



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA GEOLÓGICA

Curso 2022-2023

**Análisis comparativo de la aplicación de
diferentes binders (cal, cemento y ceniza
volcánica) para la estabilización de arcillas
yesíferas**

*Comparative analysis of the application of different
binders (lime, cement and volcanic ash) for the
stabilization of gypsum clays*

Aitor López Marcos

TUTORAS: Svetlana Melentijevic y Sol López Andrés



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA
GEOLÓGICA**

Curso 2022-2023

**Análisis comparativo de la aplicación de
diferentes binders (cal, cemento y ceniza
volcánica) para la estabilización de arcillas
yesíferas**

*Comparative analysis of the application of different
binders (lime, cement and volcanic ash) for the
stabilization of gypsum clays*

Aitor Lopez Marcos

TUTORAS: Svetlana Melentijevic y Sol López Andrés

Firmado por MELENTIJEVIC
SVETLANA - DNI ***5381**
el día 31/07/2023 con un
certificado emitido por
AC Sector Público

Firmado por LOPEZ ANDRES MARIA
SOL - ***0389** el día
31/07/2023 con un certificado
emitido por AC FNMT Usuarios

Fdo.:

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

D. D. Aitor López Marcos con NIF16097406M, estudiante del Máster en Ingeniería Geológica en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2022-2023, como autor del trabajo de fin de máster titulado “Análisis comparativo de la aplicación de diferentes binders (cal, cemento y ceniza volcánica) para la estabilización de arcillas yesíferas” y presentado para la obtención del título correspondiente. cuyas tutoras son: Svetlana Melentijevic y Sol López Andrés.

DECLARO QUE:

El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en las referencias bibliográficas. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 31 de julio de 2023

Fdo.:

AGRADECIMIENTOS:

En primer lugar, me gustaría dar las gracias a mis padres, porque gracias a su sustento he podido cursar el máster de ingeniería geológica y he podido realizar los viajes necesarios para completar el trabajo de fin de máster, además de apoyarme en todo el proyecto.

Además, también me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento a mis tutoras Svetlana Melentijevic y Sol Lopez Andrés por compartir sus conocimientos conmigo, brindarme la oportunidad de realizar este proyecto dentro de su línea de investigación y ayudarme en todo momento.

Por último, me gustaría agradecer a Guillermo Pinto de la Casa, a Ana Maria Sanchez Palomo del Laboratorio de Ingeniería Geológica de la UCM, y a Xabier Arroyo Rey y Luis Andreu Gonzalez-Iglesias de la Unidad de Técnicas Geológicas, CAI de Ciencias de la Tierra y Arqueometría, Universidad Complutense de Madrid por todo el trabajo que han realizado en sus respectivos laboratorios bajo dirección y supervisión de las tutoras de esta tesina de fin de Master.

RESUMEN:

En el presente estudio se realiza una investigación sobre la mejora de las propiedades geotécnicas y la estabilización de un suelo expansivo mezclándolo con diferentes aditivos, cal, cemento y cenizas volcánicas, en diferentes proporciones. El suelo utilizado son arcillas y limos yesíferos procedentes de Murcia. El objetivo de este estudio es determinar la viabilidad de estabilizar este tipo de materiales con cada uno de los aditivos aplicados (cemento, cenizas volcánicas y cal) para poder darles un uso en obra, evitando así la necesidad de llevarlos a vertederos y pedir préstamos cuando afecten a la proyección de la misma, el cual es un método económicamente más caro.

La evaluación de la mejora de las propiedades geotécnicas y la estabilización del material se determina mediante la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados, los cuales caracterizan el material, evalúan las propiedades volumétricas y la resistencia, tanto de la muestra en su estado natural, como de las distintas mezclas analizadas con los aditivos indicados.

En resumen, los ensayos realizados son, ensayos de identificación y compactación (granulometría escala PHI y láser, límites de Atterberg, ensayo Proctor y peso específico de las partículas sólidas), propiedades químicas y mineralógicas (Fluorescencia de rayos X – FRX, difracción de rayos X – DRX, agregados orientados – AO, determinación de pH y determinación de la conductividad), parámetros resistentes (corte directo) y parámetros de deformabilidad y volumétricos (edómetro, hinchamiento libre).

Índice

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
2	MARCO TEÓRICO	4
2.1	Características y problemática de los suelos arcillosos.....	5
2.2	Criterios de identificación de suelos expansivos.....	6
3	MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1	Materiales.....	8
3.1.1	Arcillas y limos yesíferos de la ciudad de Murcia.....	8
3.1.2	Cal.....	8
3.1.3	Cemento.....	9
3.1.4	Ceniza volcánica de Tajogaite (La Palma, Canarias).....	9
3.2	Nomenclatura utilizada.....	10
3.3	Metodología.....	11
3.3.1	Granulometría escala PHI y laser.....	11
3.3.2	Difracción de rayos X (DRX).....	13
3.3.3	Fluorescencia de rayos X (FRX).....	14
3.3.4	Límites de Atterberg.....	14
3.3.5	Picnómetro de agua.....	15
3.3.6	pH.....	16
3.3.7	Conductividad.....	16
3.3.8	Proctor.....	17
3.3.9	Edómetro.....	17
3.3.10	Corte directo.....	19
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
4.1	Granulometría escala PHI y láser.....	21
4.2	DRX.....	23
4.3	Fluorescencia de rayos X (FRX).....	27
4.4	Límites de Atterberg.....	27
4.5	Peso específico.....	29
4.6	pH y conductividad.....	30
4.7	Proctor.....	31
4.8	Edómetro.....	32
4.9	Corte directo.....	36
5	CONCLUSIONES	42
6	BIBLIOGRAFÍA	45

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Siempre que se plantee realizar cualquier tipo de estructura es necesario que los materiales sobre los que se apoye la misma cumplan con las propiedades geotécnicas solicitadas. En ocasiones, los materiales tipo suelo o tipo roca afectados no presentan las propiedades solicitadas para realizar la correspondiente cimentación, por lo tanto, es necesario adoptar una solución técnico-económica alternativa. Las soluciones más comunes son la sustitución del material solicitando un préstamo o la realización de cimentaciones especiales, por ejemplo, cimentaciones profundas.

Un tratamiento del terreno mediante estabilización del terreno se suele proponer con el objetivo de mejorar sus propiedades geotécnicas (cohesión, ángulo de rozamiento, compresibilidad, expansividad...) y no tener que hacer uso de otras medidas que pueden encarecer en exceso la obra, de esta manera reutilizando y mejorando el suelo deficiente para convertirlo en el material de construcción, de esta manera proporcionando el material para la construcción geotécnica económicamente viable.

Para poder distinguir los distintos tipos de suelos en base a sus características intrínsecas el pliego de prescripciones técnicas generales (Gerardo Bustos Pretel 2001) para obras de carretera y puentes propone la clasificación que se muestra en la Tabla I.

El objetivo principal de este estudio es aplicar diferentes binder o aditivos, tales como cal, cemento y ceniza volcánica, en distintas proporciones a unas arcillas yesíferas clasificadas como inadecuadas para determinar el grado de mejora del material natural, y en caso de ser posible, determinar que aditivo aporta los resultados más óptimos respecto a la mejora de las propiedades geotécnicas. En este caso se intenta hacer el uso de cenizas volcánicas comparando la mejora con respecto a binder tradicionales cemento y cal para poder comparar si desde el punto de vista económico y ambiental es viable sustituirlos para reducir el impacto ambiental.

Los ensayos realizados a lo largo de este proyecto son los siguientes, ensayos de identificación y compactación (granulometría escala PHI y láser, límites de Atterberg, ensayo proctor y peso específico de las partículas sólidas), propiedades químicas y mineralógicas (Fluorescencia de rayos X – FRX, difracción de rayos X – DRX, agregados orientados – AO, determinación de pH y determinación de la conductividad), parámetros resistentes (corte directo) y parámetros de doformavilidad y volumétricos (edómetro, hinchamiento libre).

Tabla I. Clasificación de los suelos (modificado del PG3, (Gerardo Bustos Pretel, 2001)

Clasificación	Condiciones
Suelos seleccionados	Materia orgánica (MO) < 0,2%
	Sales solubles (SS) < 0,2%
	Tamaño máximo (Dmax) < 100 mm
	Cernido por el tamiz 0,40 UNE (#0,40) ≤ 15%
Suelos adecuados	Materia orgánica (MO) < 1%
	Sales solubles (SS) < 0,2%
	Tamaño máximo (Dmax) < 100 mm
	Cernido por el tamiz 2 UNE (#2) < 80%
	Cernido por el tamiz 0,080 UNE (#0,080) < 35%
	Límite líquido (LL) < 40 Sí LL > 30, el índice de plasticidad (IP) será > 4
Suelos tolerables	Materia orgánica (MO) < 2%
	Contenido en yeso < 5%
	Sales solubles (SS) < 1%
	Límite líquido (LL) < 65
	Sí LL > 40, índice de plasticidad (IP) < (0,73 (LL-20))
	Asiento en ensayo de colapso < 1% Hinchamiento en ensayo de expansión < 3%
Suelos marginales	Materia orgánica (MO) < 5%
	Hinchamiento en ensayo de expansión < 5%
	Sí LL > 90, índice de plasticidad (IP) < (0,73 (LL-20))
Suelos inadecuados	No se pueden incluir en las categorías anteriores

2 MARCO TEÓRICO

En este apartado se explican las características y la problemática que pueden presentar los suelos arcillosos, y dado que la muestra a estudiar es un suelo expansivo, a continuación, se definen los criterios de identificación que se han utilizado en este estudio.

Hasta ahora, se han documentado numerosos casos de la problemática de los suelos expansivos en muchos países tales como Venezuela, Estados Unidos, Turquía, Perú, México, Israel, India, Ghana, Etiopía, Colombia, Cuba, Chile, Canadá, Argentina, Australia, España, etc. (Chen, 1975).

Los suelos expansivos, dependiendo de sus características fisicoquímicas, son un conjunto mineralógico formado por partículas finas, llamadas arcillas plásticas, las cuales tienden a experimentar cambios volumétricos bajo condiciones específicas (Carrasco, 2013).

Dichos cambios volumétricos están condicionados por los cambios en su contenido de humedad, y pueden resultar en hinchamiento o retracción (Burland et al., 2012).

Como se ha planteado, los suelos arcillosos son dependientes de la humedad, cuando se encuentran con una humedad baja (humedad inferior al 15%), se estima un riesgo de expansión, dada la facilidad con la que el suelo puede absorber agua. En cambio, si se encuentra en un estado húmedo (humedad superior al 30%), probablemente ya se ha producido la mayoría de la expansión (Patrone y Perfumo, 2002).

2.1 Características y problemática de los suelos arcillosos

Los suelos con composición arcillosa están formados en gran medida por partículas inferiores a 2 micras, han sido formados por procesos de descomposición química y su composición varía según la roca de la que proceden (Jimenez Salas, J.A., 1975), determinan la plasticidad del suelo y la capacidad para retener agua según su proporción y composición. Los minerales más comunes en suelos arcillosos son mica-illita, clorita y pirofilita, pero también pueden contener minerales menos comunes como esmectita, bentonita, sepiolita y paligorskita (De Santiago, 2022) (Tabla II). Estos últimos, son los minerales que otorgan características diferentes al suelo, tales como suelos expansivos o inestables, debido a la abundancia de minerales de la arcilla que tengan la capacidad de adsorber agua en su estructura y de esa forma aumentar su tamaño (esmectita y bentonita).

Tabla II. Clasificación de los minerales de la arcilla según su estructura cristalina (De Santiago,2022).

LÁMINA	DIOCTAÉDRICOS (Al ³⁺)		TRIOCTAÉDRICOS (Mg ²⁺)	
T-O (1:1)	CANDITAS Halloisita	Caolinita Nacrita Dickita	SERPENTINAS	Antigorita Crisotilo Lizardita Bertierina
T-O-T (2:1)	Pirofilita ESMECTITAS Vermiculitas Illitas Micas	Montmorillonita Beidellita Nontronita Moscovita Paragonita	Talco ESMECTITAS Vermiculitas Illitas Micas	Saponita Hectorita Estevensita Biotita Flogopita
T-O-T-O (2:1:1)	CLORITAS			
FIBROSO	Paligorskita		Sepiolita	

El material de estudio de este proyecto es un material expansivo, tal y como se podrá ver en el capítulo de caracterización mediante difracción de rayos X de agregados orientados, su composición tiene una alta proporción de esmectita.

Los suelos expansivos tienden a experimentar cambios volumétricos, los cuales, se asocian a un cambio en el contenido de humedad, lo cual puede causar un proceso de hinchamiento

o de retracción (Burland et al., 2012). Estos procesos son peligrosos al realizar actuaciones en zonas con suelos expansivos, debido a que el hinchamiento o la retracción del suelo puede generar asentamientos diferenciales o un exceso de presión sobre las estructuras, por lo tanto, en el caso de trabajar con este tipo de materiales es necesario tomar medidas, tales como la estabilización del material.

Según *De Santiago, (2022)* los factores que influyen en el hinchamiento de un suelo son; la mineralogía de las arcillas; la carga eléctrica que tiene la partícula y la composición de cationes; las propiedades químicas del agua; los parámetros de humedad, plasticidad y densidad seca del suelo; la fábrica y estructura del suelo.

2.2 Criterios de identificación de suelos expansivos

Para identificar el potencial expansivo de un suelo se consideran dos tipos de agrupaciones, la primera se basa en las características físicas del suelo, la segunda se basa en las propiedades mineralógicas del mismo, (Nelson et al.2015)

En la presente memoria se van a determinar las características físicas mediante los límites de Atterberg y el ensayo de hinchamiento libre, las propiedades mineralógicas mediante los ensayos de difracción de rayos X de muestra total y agregados orientados y fluorescencia de rayos X del suelo con el objetivo de poder utilizar los dos tipos de agrupaciones para determinar el carácter expansivo de la muestra de arcillas y limos yesíferos aflorantes en la localidad de Murcia.

Skempton (1953) combinó los resultados obtenidos de ensayos de plasticidad con los resultados obtenidos del contenido de arcilla para definir la actividad de la arcilla (Actividad = Índice de plasticidad / contenido de arcilla). Además, Skempton (1953) clasificó en 3 tipos las arcillas en base a su actividad:

- Actividad inferior a 0,75, es denominada como “inactiva”.
- Actividad entre 0,75 – 1,25, es denominada como “normal”.
- Actividad igual o superior a 1,25, es denominada como “activa”.

Mediante los resultados de laboratorio, Vijayverguya y Ghazzaly (1973) proponen definir el grado de expansividad según el siguiente criterio expresado en la Tabla III.

Tabla III. Propuesta del grado de expansividad según el hinchamiento libre (Vijayverguya y Ghazzaly, 1973)

Presión máxima de hinchamiento (kPa)	Hinchamiento libre % ($\sigma_v=10\text{kPa}$)	Grado de expansividad
<30	0-1	Bajo
30-120	1-4	Medio
120-300	4-10	Alto
>300	>10	Muy alto

Chen (1988) y Holtz & Gibbs (1956) han correlacionado los valores del límite líquido y del índice de plasticidad con el grado de expansividad esperable en un terreno según se recoge en las Tablas IV y V.

Tabla IV. Propuesta del grado de expansividad según el límite líquido (Chen, 1988)

Grado de expansividad	% <0,08mm	Límite Líquido LL (%)	Expansión probable %	Presión máxima de hinchamiento (kPa)
Bajo	<30	<30	<1	<150
Medio	30-60	30-40	1-5	150-250
Alto	60-95	40-60	3-10	250-1000
Muy alto	>95	>60	>10	>1000

Tabla V. Propuesta del grado de expansividad según el índice de plasticidad (Holtz y Gibbs, 1956)

Grado de expansividad	Contenido Coloidal % <0,001mm	Índice de plasticidad IP (%)
Bajo	<15	<20
Medio	13-23	15-28
Alto	20-31	25-41
Muy alto	>28	>35

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

3.1.1 Arcillas y limos yesíferos de la ciudad de Murcia

La muestra que se va a utilizar a lo largo de este estudio son arcillas y limos yesíferos aflorantes en la localidad de Murcia, suelo clasificado según la clasificación que aparece en la tabla I como inadecuado debido a que el hinchamiento libre de la muestra es superior al propuesto para pertenecer al resto de grupos. Además, el resto de las características de esta muestra de arcillas y limos yesíferos muestran que es un suelo de mala calidad, y destacan las siguientes:

- Contenido en yeso superior al 3%.
- Aproximadamente el 95% del material tiene un tamaño limo/arcilla.
- El límite líquido (LL) de la muestra es 51,6% y el índice de plasticidad (IP) es 33,5%.

A lo largo de la memoria se expondrán los resultados de los ensayos de laboratorio que corroboran la información citada anteriormente y se mostrará si es posible mejorar las cualidades de la muestra mediante mezclas con diferentes aditivos en distintas proporciones y con cuál de las mezclas se obtienen los mejores resultados.

3.1.2 Cal

Según el *Pliego de especificaciones técnicas generales para el tratamiento de los suelos con cal*, existen varios tipos de cales que se pueden utilizar para la estabilización de suelos, las cuales están normalizadas según la norma UNE-EN 459-1, y son las siguientes:

- Cales aéreas: Son cales cuya composición principal es óxido e hidróxido de calcio e hidróxido de magnesio. Esta cal se altera al aire debido a que se endurecen lentamente al entrar en contacto con el CO₂ atmosférico, por lo tanto, hay que tener cuidado al manipularla ya que puede perder sus propiedades a lo largo del proceso. No se endurece al entrar en contacto con el agua, a diferencia de las otras cales, y según el *Manual de estabilización de suelos con cemento y cal (IECA, 2008)*, “se obtienen a partir de rocas calizas con contenidos en carbonatos superiores al 95%”.
- Cales hidráulicas: A diferencia de las anteriores, se endurecen con el agua, y según el *Manual de estabilización de suelos con cemento y cal (IECA, 2008)*, “se obtienen a partir de calizas que contienen arcillas (sílice y alúmina)”, es decir, tras el proceso de

calcinación, durante la hidratación, se forman partículas de silicatos y de aluminatos cálcicos, los cuales le otorgan a la cal las propiedades hidráulicas.

Estos dos tipos de cales son las más importantes, pero existen otros tipos menos utilizados en los que no se va a hacer hincapié en este trabajo.

La cal que se utilizará en este estudio es CAL Hidráulica Natural NHL-5 Tigre que se caracterizará mediante difracción y fluorescencia de rayos X (DRX y FRX) que se mostrarán posteriormente.

3.1.3 Cemento

El cemento es uno de los materiales más habituales que se utiliza para realizar mejoras de terreno, debido a que otorga al material una mayor resistencia mecánica, una mayor capacidad de soporte y por ende aumenta su durabilidad y estabilidad dimensional.

Los cementos Portland se obtienen mediante la molienda conjunta del clinker, que es el producto resultante de la calcinación adecuada de mezclas de calizas y arcillas. Además del clinker, se añaden adiciones activas y una cantidad apropiada de un regulador de fraguado, generalmente piedra de yeso natural.

El clinker está compuesto principalmente por silicato tricálcico (SC_3) o Hatrurita, silicato bicálcico (SC_2) o Iarnita, aluminato tricálcico (AC_3) o celita y ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF) o brownmillerita, junto con otros componentes secundarios.

Según el *“Manual de estabilización de suelos con cemento y cal (IECA, 2008)*, “Los cementos portland sin adiciones no suelen utilizarse en las mezclas, siendo lo más habitual recurrir a cementos con cenizas volátiles”.

El cemento portland comercial que se utilizará en este estudio se caracterizará mediante DRX y FRX como se muestra posteriormente.

3.1.4 Ceniza volcánica de Tajogaite (La Palma, Canarias)

Las cenizas volcánicas son parte del material piroclástico, asociado a la actividad volcánica, el magma procedente del interior de la tierra asciende hasta la corteza, donde busca camino hacia la superficie a través de fisuras, hasta ascender y formar una estructura en forma de chimenea.

Una vez dicha chimenea está activa expulsa el magma en forma de lava y material piroclástico, combinado con gases. El material piroclástico expulsado tiene diversa

granulometría, varía entre polvo fino y fragmentos métricos, las cenizas volcánicas proceden de dicho material, con la característica de que su granulometría es de un tamaño inferior a 2mm (tamaño arena) (Tarbuck et al., 2005).

Las cenizas volcánicas son muy diversas en cuanto a su composición, debido a que el magma del que proceda puede ser un magma ácido o un magma básico, por lo tanto, es necesaria una caracterización del material piroclástico para su uso.

La ceniza volcánica utilizada en esta memoria (C3) proceden de la erupción de Tajogaite en isla de La Palma (Canarias) y fueron recogidas en la carretera de Tacande (LP 212) en las coordenadas UTM 218.747 y 3.171.410, el 10 de diciembre de 2021 a 3.150 Km del centro emisor.

La ceniza volcánica se caracterizará mediante el DRX, FRX, peso específico de partículas sólidas mediante picnómetro de agua y se muestra posteriormente.

3.2 Nomenclatura utilizada

En la Tabla VI se presenta la nomenclatura de las muestras utilizadas en los ensayos de laboratorio. A la cantidad de muestra utilizada se le ha añadido los porcentajes de aditivos indicados con respecto al peso seco de la muestra. Cabe destacar que las muestras que contienen cenizas volcánicas poseen cal, pero el porcentaje de cal es respecto al peso de ceniza volcánica utilizada, no respecto al peso seco total de muestra.

Tabla VI. Denominación de cada muestra.

Denominación	Aditivo		
	Ceniza volcánica	Cal	Cemento
TV0C0 (Arcillas yesíferas remodeladas)			
TV0C1		1%	
TV0C3		3%	
TV0C5		5%	
TV10C5	10%	5% con respecto al peso seco de ceniza	
TV20C5	20%	5% con respecto al peso seco de ceniza	
TV30C5	30%	5% con respecto al peso seco de ceniza	
TV0CEM1			1%
TV0CEM3			3%
CENIZA C3	100%		

3.3 Metodología

Todos los análisis y ensayos se han realizado bajo las normas UNE. Los ensayos de caracterización de las muestras se han realizado en la Unidad de Técnicas Geológicas (CAI de Ciencias de la Tierra y Archeometría) y los ensayos en el Laboratorio de Geodinámica, del Dpto. de Estratigrafía, Geodinámica y Paleontología de la Facultad de Ciencias Geológicas, ambos de la Universidad Complutense de Madrid.

3.3.1 Granulometría escala PHI y laser

El ensayo de granulometría se ha realizado según indica la norma UNE-EN 933-2:2022, con el objetivo de determinar el tamaño de grano que compone el material a estudiar y poder clasificarlo.

El ensayo granulométrico se ha realizado mediante escala PHI y láser. El primer paso a realizar en el ensayo de granulometría escala PHI es calentar la muestra para que pierda la humedad, una vez secada la muestra se preparan una batería con los siguientes tamices normalizados, N°10 (2 mm), N°16 (1,2 mm), N°30 (0,6 mm), N°50 (0,3 mm), N°100 (0,15 mm), N°200 (0,0075 mm). El siguiente paso es añadir una cantidad de muestra previamente pesada en la parte superior de la columna, se disponen los tamices en un equipo de vibración durante 30 minutos y se pesa la muestra retenida en cada tamiz, introduciendo dichos datos en la curva granulométrica.

El análisis granulométrico láser se ha realizado utilizando un equipo Honeywell Microtrac X100, con capacidad para medir fracciones de 700 a 0,10 μm .

Una vez determinada la granulometría de las muestras se aplicará la clasificación USCS, el cual es un sistema utilizado para clasificar y describir diferentes tipos de suelos de manera estandarizada. La clasificación de suelos USCS se basa en dos criterios principales: el tipo de suelo y sus propiedades físicas. Utiliza letras y símbolos para representar diferentes tipos de suelos y sus características. Los términos principales utilizados en la clasificación son:

- Grava (G): Representa partículas gruesas, mayores a 2 mm de diámetro.
- Arena (S): Representa partículas gruesas, de 0.075 mm a 2 mm de diámetro.
- Limo (M): Representa partículas finas, de 0,002 mm a 0,075 mm de diámetro
- Arcilla (C): Representa partículas muy finas, menores a 0.002 mm de diámetro.

Además de estas cuatro letras, se utilizan modificadores para describir las propiedades del suelo.

Cuando un suelo muestra que la mayor parte de su granulometría está compuesta por partículas gruesas, es necesario determinar la graduación para poder aplicarle la segunda letra, para ello, es necesario calcular el C_u y el C_z , para ello se utilizan las siguientes fórmulas:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \rightarrow > 4 \quad \text{y} \quad C_z = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}} \rightarrow \text{entre 1 y 3}$$

Donde D_{10} es el percentil 10, D_{30} es el percentil 30 y D_{60} es el percentil 60, los percentiles muestran que porcentaje de material está por debajo del valor indicado.

En el caso de las arenas se utilizan las mismas formulas, pero C_u debe ser superior a 6.

Para suelos granulares, en función de los parámetros definidos C_u y C_z , se emplean:

- ✓ Bien graduado (W): Indica una amplia distribución de tamaños de partículas en el suelo.
- ✓ Mal graduado (P): Indica una distribución relativamente uniforme de tamaños de partículas en el suelo.

Cuando el suelo muestra que la mayor parte de su granulometría está compuesta por partículas finas es necesario determinar su plasticidad para poder aplicarle la segunda letra, para ello se necesita conocer el límite líquido (LL), límite plástico (LP) y Índice de plasticidad (IP), la determinación de dichos parámetros se explica en el apartado 3.3.4.

Para suelos cohesivos se emplean los siguientes descriptores:

- ✓ Baja plasticidad (L): Indica que el suelo tiene una baja o media plasticidad (0-50).
- ✓ Alta plasticidad (H): Indica que el suelo tiene una alta plasticidad (>50).
- ✓ Material orgánico (O): Indica la presencia significativa de material orgánico en el suelo.

Una vez calculados los parámetros de plasticidad de los suelos cohesivos se introducen los datos en la gráfica representada en la Figura 1 y se obtiene la nomenclatura del suelo. En esta figura, la línea A limita las arcillas inorgánicas de alta plasticidad de los limos inorgánicos de alta plasticidad mediante la expresión $IP=0,73(LL-20)$ y la línea U indica el límite superior de la relación del índice de plasticidad con el límite líquido (LL) mediante la expresión $IP=0,9(LL-8)$.

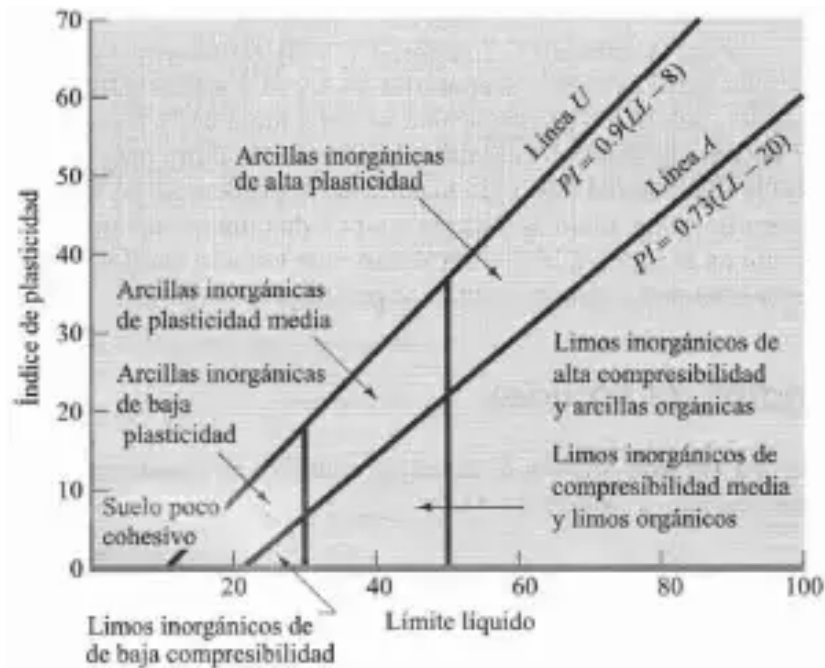


Figura 1. Carta de Plasticidad de Casagrande. (Braja M. Das, 2001).

3.3.2 Difracción de rayos X (DRX)

El ensayo de difracción de rayos X se ha realizado según indica la norma UNE-EN-15305.

Esta técnica se emplea para la caracterización de las fases cristalinas y amorfa presentes en los materiales de estudio. Para ello, el primer paso es la preparación de la muestra, que debe ser molida en mortero de ágata para evitar su contaminación, hasta lograr una granulometría inferior a 53 μm de 1 g de muestra representativa.

Se ha utilizado el método del polvo policristalino desorientado. Los difractogramas se han obtenido en un difractómetro BRUKER D8 Advance utilizando radiación $\text{CuK}\alpha$, en un intervalo angular de 2θ de 10 a 60° , con un tamaño de paso de $0,02^\circ$ y un tiempo por paso de 1s. Los diagramas se han identificado con el programa EVA DIFFRACplus 13.0 por comparación con la base de datos PDF2 (Powder Diffraction File) del ICDD (International Center for Diffraction Data).

A partir de la interpretación y análisis de los difractogramas, se han determinado y semicuantificado las fases cristalinas presentes en las muestras. El análisis semicuantitativo se ha realizado siguiendo el método de Chung (1975) y utilizando el software EVA de Bruker.

El análisis para la caracterización de la mineralogía de arcillas se ha llevado a cabo utilizando la siguiente metodología:

1. Extracción de la fracción $<2 \mu\text{m}$ en una suspensión preparada con agua desionizada y dispersada con ultrasonidos.
2. Preparación de agregados orientados. Se han obtenido pipeteando 1 cm^3 de la suspensión sobre placas de vidrio adaptadas al portamuestras del difractómetro. Se han preparado 3 agregados orientados (AO) de la muestra.
3. Obtención de los perfiles de difracción de los AO. Se han obtenido diagramas sobre el AO secado al aire (AOST), el AO tratado durante 48 horas con atmósfera de etilenglicol a 60°C (AOEG) y el AO tratado térmicamente mediante calentamiento a 550°C durante al menos dos horas (AOTT). Los difractogramas de AO se han rodado en un intervalo angular de 2 a 35° , un tamaño de paso de $0,02^\circ$ y un tiempo por paso de 1 s .

La identificación de los minerales de la arcilla se ha resuelto de acuerdo con los criterios de Srödon (1984) y Moore y Reynolds (1989). Esta identificación se ha hecho de acuerdo con la posición de la serie armónica (00l) de reflexiones basales en los difractogramas sin tratamiento (AOST), solvatados con etilenglicol (AOEG) y calentados a 550°C (AOTT). Para la estimación semicuantitativa de cada fase arcillosa presente se ha utilizado el método de los poderes reflectantes aplicados sobre las áreas medidas en reflexiones características de cada mineral.

3.3.3 Fluorescencia de rayos X (FRX)

El análisis químico se ha realizado mediante FRX en un espectrómetro BRUKER S2 Ranger con radiación de paladio siguiendo la norma UNE-EN 15309. Las muestras fueron molidas y tamizadas a $125 \mu\text{m}$ y fueron preparadas en forma de pastillas con una mezcla de $9,2 \text{ g}$ de muestra y $0,8 \text{ g}$ de cera WAX, aproximadamente. El método utilizado ha sido el EQUA Oxides cuyo límite de detección es de $0,01\%$ (100 ppm).

Los resultados de los análisis químicos se expresan en % en óxidos para elementos mayores y menores y en ppm para los elementos traza.

3.3.4 Límites de Atterberg

El ensayo de determinación de los límites de Atterberg se ha realizado según la norma UNE-EN ISO 17892-12:2018.

El límite líquido (LL) es el contenido de agua en el suelo en el cual el suelo pasa de un estado líquido a un estado plástico. La determinación del límite líquido se realiza utilizando el aparato de Casagrande. El procedimiento general es el siguiente:

Se toma una muestra representativa del suelo y se seca en una estufa a 60°C durante 24 horas, se tamiza la muestra para eliminar las partículas mayores a 425 μm . Después, se mezcla la muestra con agua hasta obtener una pasta homogénea, la cual, se coloca en el aparato de Casagrande y se le aplica una serie de golpes para que se cierre una ranura en la muestra, se repite el procedimiento hasta obtener 3 resultados diferentes en cada muestra, uno igual a 25 golpes, otro entre 15 y 25 golpes y un último entre 25 y 35 golpes, para ello se varía el contenido de agua de la muestra, al obtener los 3 resultados, se pesan las muestras y se secan en una estufa a 60°C durante 24 horas, con el objetivo de pesar las muestras en su estado seco, una vez tenemos la pesada en estado húmedo y seco se puede calcular la humedad de cada muestra.

El límite plástico (LP) es el contenido de agua en el suelo en el cual el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido.

Para determinar del límite plástico el procedimiento general es el siguiente; Se toma una porción de suelo húmedo y se amasa hasta obtener una pasta homogénea. Se forma un cilindro de suelo de aproximadamente 3 mm de diámetro. Se amasa la muestra en forma de cilindro hasta que la muestra se quiebre en dos partes, dicho proceso se repite hasta obtener 15g de muestra ensayada. Por último, se seca la muestra en una estufa a 60°C durante 24 horas, se pesa y se determina el contenido de agua correspondiente. Este contenido de agua se considera el límite plástico.

Una vez tenemos los dos parámetros (LL y LP) podemos obtener el índice de plasticidad (IP) el cual es la diferencia entre el límite líquido (LL) y límite plástico (LP) de un material expresado en porcentaje, el índice de plasticidad (IP) se puede utilizar para clasificar los suelos (apartado 3.3.1) y para determinar la expansividad del suelo (apartado 2.2).

3.3.5 Picnómetro de agua

El ensayo de del picnómetro líquido se ha realizado según indica la norma UNE-EN ISO 1183-1:2019 para determinar el peso específico de las partículas sólidas.

El primer paso para realizar el método del picnómetro líquido es introducir 3 probetas con agua en un baño controlado termostáticamente a 20°C durante 30 minutos, una vez pasado el tiempo se extraen los recipientes, se enrasan y se toma la primera pesada (m_1).

El siguiente paso es vaciar más o menos la mitad de cada recipiente y tomar la segunda pesada (m_2). A continuación, se añaden 15 g de muestra en cada recipiente y se toma la tercera pesada (m_3).

Para tomar la última pesada, previamente hay que introducir los recipientes en una bomba de vacío durante 30 minutos, una vez pasado el tiempo, se introducen los recipientes en un baño a temperatura constante durante 1 hora, la temperatura del agua del baño se mide en cada pesada para realizar las posteriores correcciones por temperatura, una vez pasada la hora, se enrasan y se puede tomar la cuarta pesada (m_4).

Una vez obtenidas las 4 pesadas se puede calcular la densidad de las partículas de la muestra.

3.3.6 pH

El ensayo de determinación del pH se ha realizado según indica la norma ISO 10390:2005 para determinar el pH de la muestra. El pH-metro utilizado ha sido de la marca Crison.

Al comenzar el ensayo de determinación del pH, se recogen 5 g de muestra de suelo y se añaden a una probeta que contenga 25 ml de agua, una relación agua/suelo de 5/1.

El siguiente paso es mezclar el contenido de la probeta y mantenerlo a una temperatura de 20° C durante 1 hora.

Transcurrida la hora, se mide el pH de dos sustancias patrón para calibrar el pH-metro, una vez calibrado se mide el pH de la muestra a estudiar.

En la tabla VII se clasifican los suelos en base al valor de pH.

Tabla VII. Clasificación del suelo en base al pH.

pH (medido en agua en disolución 1/5)	Clasificación
Menor de 5.0	Muy ácido
Entre 5.0 y 6.5	Ácido
Entre 6.5 y 7.5	Neutro
Entre 7.5 y 9	Básico
Mayor de 9	Muy básico

3.3.7 Conductividad

El ensayo de conductividad se ha realizado según indica la norma UNE-77308. El conductímetro utilizado ha sido un conductímetro de la marca Crison.

El primer paso es mezclar 20 g de muestra y 100 ml de agua y agitar durante 30 minutos, teniendo en cuenta que el agua debe estar a 20°C. Transcurrido el tiempo de agitación, el

material es filtrado con papel de filtro. El conductímetro es calibrado con patrones adecuados. Por último, se aplica una corrección para expresar la temperatura del agua a 25°C.

3.3.8 Proctor

El ensayo Proctor se ha realizado atendiendo a la norma UNE 103-501-94, utilizando el molde Harvard o molde de miniproctor ajustando la energía utilizada para que resulte equivalente a la del proctor modificado. El propósito de este ensayo es determinar las condiciones óptimas de compactación, humedad óptima y densidad máxima.

El ensayo Proctor tiene el objetivo de determinar la densidad máxima y la humedad óptima del material a ensayar. El primer paso es preparar la probeta, para ello se mezclan 140g de material con la cantidad de agua calculada previamente para alcanzar cierto porcentaje de humedad. Se deja reposar el material en una bolsa hermética durante 1 hora. El siguiente paso es preparar la probeta en un molde Harvard, el cual tiene 86,52 cm³, la maza pesa 0,5 kg, la altura de caída es de 20,5 cm, el número de capas es de 5 y el número de golpes por capa es de 46.

Una vez preparada la probeta se toma una pesada y se deja secar en la estufa durante 48 horas. Pasadas las 48 horas se toma otra pesada para obtener la densidad seca del material.

Dicho proceso se repite con diferentes humedades hasta obtener 5 puntos representativos con los que poder realizar un gráfico que enfrente la humedad y la densidad, en el cual se obtiene la densidad máxima y la humedad optima del material.

3.3.9 Edómetro

El ensayo edométrico se ha realizado para calcular la presión de hinchamiento de un suelo, para el cual se ha aplicado la norma UNE 103 602, y el ensayo de consolidación, para el cual se ha aplicado la norma UNE-EN ISO 17892-8:2021.

Para realizar el ensayo de la determinación del hinchamiento libre, se prepara una probeta de 7 cm de diámetro y 2 cm de altura, dicha probeta se introduce en la célula montada según las indicaciones que se muestran en la norma. Se aplica una presión vertical de 10 kPa sobre la probeta y se anota la lectura inicial del sensor de deformaciones después de 5 minutos. Luego se llena de agua el recipiente de la célula y se toman las lecturas del sensor de deformaciones hasta alcanzar el equilibrio. La diferencia entre la última lectura y la inicial representa el incremento de altura experimentado por la probeta, tal y como se indica en la siguiente expresión:

$$\%H = \frac{\Delta H}{H_0}$$

Donde, %H = Hinchamiento %; ΔH = Incremento de altura en carga inicial mm y H_0 = Altura inicial probeta mm

En cada ensayo edométrico se han utilizado diferentes mezclas, todas ellas se han realizado con material tamizado junto con su correspondiente binder en la proporción correcta, la probeta debe tener unas dimensiones de 7 cm de diámetro y 2 cm de altura, la cual se introducirá en la célula y a continuación se llena de agua el compartimento de la célula hasta que todos los poros estén saturados.

A continuación, se aplica una carga vertical variable, cada 24 horas se va incrementando, en los escalones de hinchamiento libre y de 1500 kPa se han mantenido los escalones durante 48 horas, los pesos que se van a utilizar en los distintos escalones para las muestras de mezcla con diferente binder de este estudio son los siguientes; 20, 40, 80, 150, 300, 600, 1000 y 1500 kPa. Durante cada escalón se registran las variaciones en la deformación vertical de la probeta mediante sensores.

Una vez terminados los escalones, se va reduciendo el peso aplicado escalonadamente, manteniendo los pesos durante 24 horas, los pesos que se van a utilizar en los distintos escalones de descarga en este estudio de muestras de mezcla de material natural con diferente binder son los siguientes; 600, 150, 40, 10 y 5 kPa, al igual que en el proceso de consolidación, se registran las variaciones en la deformación vertical.

Una vez obtenidos los resultados, se calcula el índice de poros inicial y el índice de poros resultante de cada escalón, para generar la curva de compresibilidad, en la cual se puede apreciar la disminución del índice de poros en relación con el aumento del esfuerzo axial en la etapa de carga, y el aumento del índice de poros en relación con el descenso del esfuerzo axial en la etapa de descarga.

Además, se pueden calcular los siguientes parámetros para caracterizar el material, el módulo edométrico (E_m), el módulo de descarga (D_m), el índice de compresión (C_c), el índice de recompresión (C_s), el coeficiente de compresibilidad (a_v) y el coeficiente de compresibilidad volumétrica (m_v), mediante la curva edométrica (Figura 2) y las siguientes formulas:

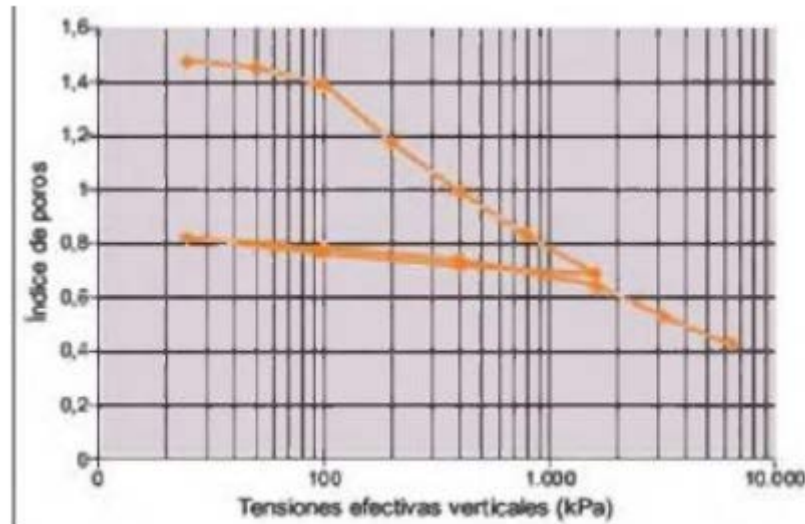


Figura 2. Curva edométrica (Lancellota, 1991)

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log(\sigma_2 - \sigma_1)} \quad e_1 - e = C_s \log \frac{\sigma'}{\sigma'_1} \quad a_v = \frac{e_1 - e_2}{\sigma_1 - \sigma_2}$$

$$m_v = \frac{a_v}{1 + e_0} \quad E_m = \frac{1}{m_v} \quad D_m = \frac{\Delta\sigma'_v}{\Delta\varepsilon_v}$$

Donde, $\Delta\sigma'_v$ = incremento de presión efectiva vertical; $\Delta\varepsilon_v$ = incremento en deformación vertical unitaria; e_0 = índice de poros inicial; e_n = índice de poros en un punto de la curva edométrica y σ_n = presión efectiva vertical en un punto de la curva edométrica.

3.3.10 Corte directo

El ensayo de corte directo se ha realizado según indica la norma UNE-EN ISO 17892-10:2019

El ensayo de corte directo se realiza en un dispositivo llamado caja de corte. Esta caja consiste en una muestra de suelo que se coloca entre dos placas horizontales, conocidas como platos de corte. Una de las placas se mantiene fija, mientras que la otra se desplaza horizontalmente aplicando una fuerza, generando así un corte en el suelo.

Para realizar el ensayo de corte directo, se preparó la muestra de suelo formando una pastilla de 25 mm de altura y 50 mm de lado. Para cada mezcla de este estudio se han realizado cuatro ensayos, de 50, 100, 200 y 400kPa de tensión normal.

El ensayo está separado en tres fases, la primera fase es la saturación, donde se satura de agua la caja en la que está situada la muestra y se miden las variaciones en volumen que sufre la muestra a lo largo del tiempo.

La segunda fase es la de consolidación, en la cual se comprime la muestra ejerciendo solamente las cargas verticales citadas anteriormente aplicando las tensiones normales, se miden las variaciones de volumen que sufre la muestra a lo largo del tiempo.

La tercera fase es la de rotura, la muestra de suelo sigue sometida a una tensión normal, que es la fuerza vertical aplicada sobre el suelo en fase de consolidación, y a una carga tangencial, que es la fuerza horizontal que genera el corte, en este caso para las muestras de material natural remoldeado mezclado con diferente binder se ha aplicado una velocidad de rotura de 0,003 mm/min. Durante el ensayo, se registran las deformaciones volumétricas midiendo las deformaciones verticales y horizontales, además de las fuerzas aplicadas al suelo. A partir de estos datos, se obtiene la resistencia al corte del suelo, que se expresa mediante la cohesión y el ángulo de rozamiento tal y como se puede ver en la Figura 3.

Para poder calcular los parámetros de cohesión y ángulo de rozamiento es necesario calcular la tensión tangencial a lo largo del ensayo, para ello se utiliza la siguiente fórmula, la cual se aplica para cada medida tomada del ensayo:

$$\tau = \frac{F_{\tau}}{A}$$

Donde, F_{τ} = fuerza tangencial y A = área.

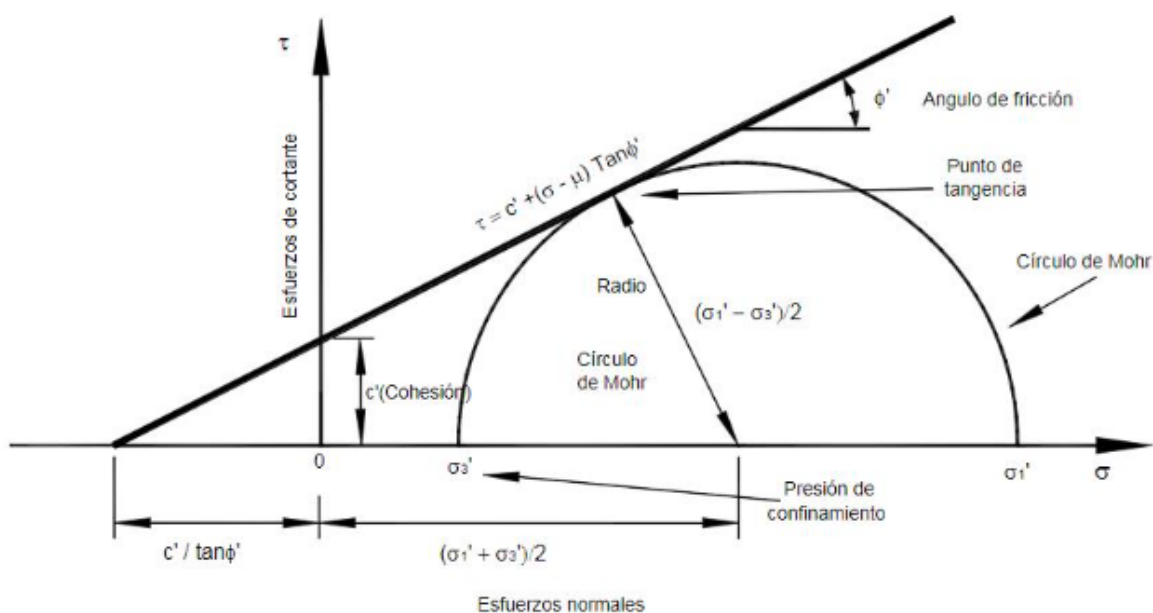


Figura 3. Esquema del círculo de Mohr, la envolvente y los parámetros resistentes. En <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/la-inestabilidad-de-laderas-en-la-ingenieria-civil>.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Granulometría escala PHI y láser

Se ha realizado un ensayo de granulometría para la muestra natural para determinar el tamaño de partícula de la muestra, para poder determinar qué porcentaje de la muestra corresponde a material tipo grava, arena, y finos (tamaño limo y arcilla). La curva granulométrica se representa en la figura 4.

Tal como muestran los resultados, un 5,16% de la muestra es de tamaño arena, mientras que el 94,84% restante es de tamaño arcilla/limo.

Para determinar la granulometría de las muestras, se han realizado 4 ensayos de granulometría laser, en dos de ellos se utilizó la muestra natural de arcilla yesífera, uno en su estado natural y otro con la muestra machacada mediante el mortero de ágata. Los otros 2 ensayos corresponden a la muestra ceniza C-3 en estado natural (inalterada) y alterada.

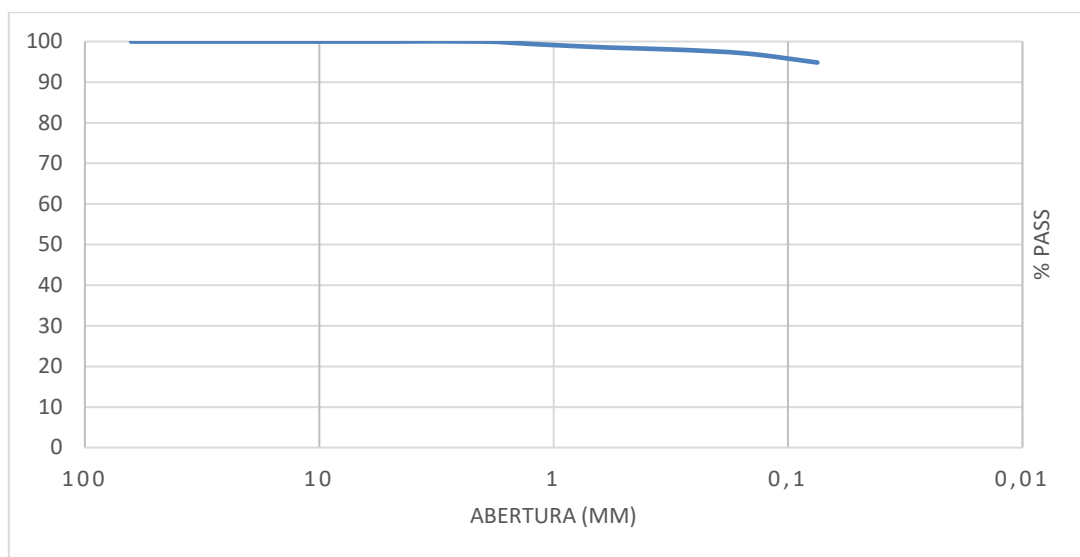


Figura 4. Curva granulométrica de la muestra TV0C0 en su estado natural.

En la figura 5 se muestran las curvas granulométricas resultante de cada ensayo.

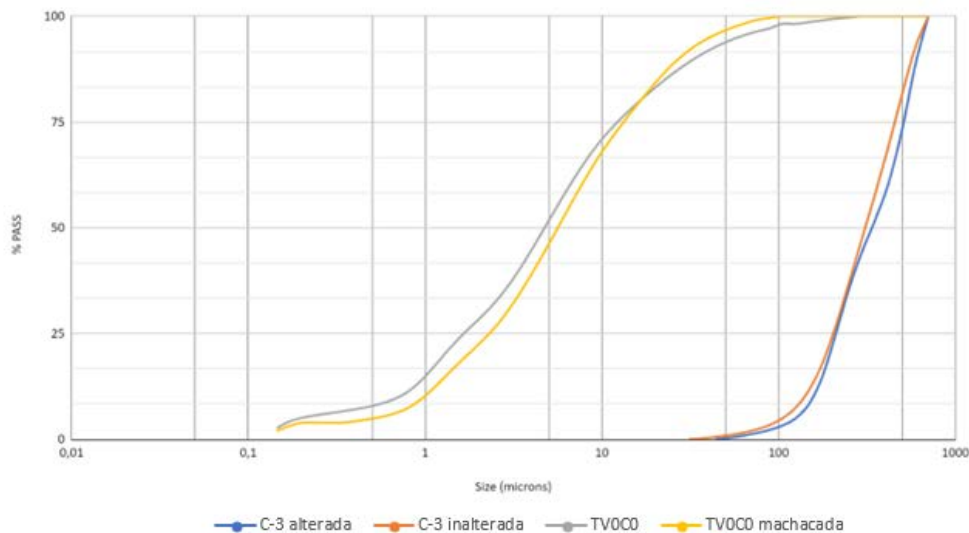


Figura 5. Curva granulométrica de las muestras TV0C0, TV0C0 machacada, C-3 y C-3 alterada.

Tal y como se puede ver en la figura 5, la muestra machacada y natural son similares, el material de tamaño inferior a 70 micras se clasifica como limo, y el material de tamaño inferior a 2 micras se clasifica como arcilla, por lo tanto, el 67% de la muestra es de tamaño limo, obteniendo como resultado final que la muestra está compuesta por un 5,16% de arena, un 27,84% de arcilla y un 67% de limo.

La muestra de ceniza volcánica, C3, en cambio, muestran una granulometría superior a 2 micras, prácticamente en su totalidad son de tamaño arena.

Para aplicar la clasificación UCSC es necesario conocer los parámetros de plasticidad de la muestra, para el estudio del material natural, tal y como expresan los resultados de plasticidad que aparecen más adelante (apartado 4.4), el LL del material de arcilla yesífera de Murcia es 51,604%, el LP 18,064% y el Índice de plasticidad es 33,540%.

Según el gráfico de plasticidad de Casagrande (Figura 1) la muestra supera el valor de LL=50%, por lo tanto, es un material de alta plasticidad, y supera la línea A, por lo tanto, la nomenclatura que recibe la muestra TV0C0 es CH, arcillas de alta plasticidad.

En cuanto a las cenizas, debido a que prácticamente en su totalidad está compuesta por partículas tamaño arena, hay que determinar su graduación para añadir la nomenclatura. Los percentiles de la ceniza son los siguientes; $D_{10} = 157$ micras; $D_{30} = 228,3$ micras; $D_{60} = 414,7$ micras.

Aplicando las fórmulas citadas en el apartado 3.3.1, obtenemos un valor de Cu de 2,64 y un valor de Cz de 0,8. Dado que el valor de Cu es inferior a 6 y el valor de Cz no entra en el rango entre 1 y 3, la nomenclatura de la ceniza es SP.

4.2 DRX

En las figuras 6 a 9 se recogen los diagramas de DRX de muestra total identificados de la muestra TVOC0 y de los tres binders utilizados para esta memoria, cal, ceniza volcánica y cemento y en la tabla VIII la semicuantificación de fases cristalinas.

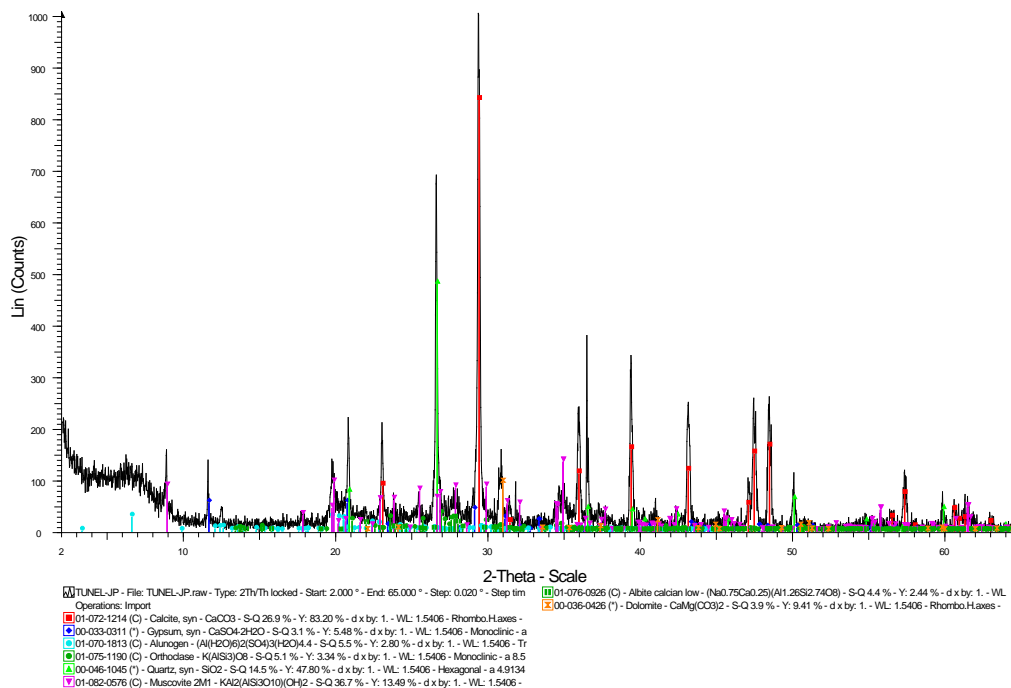


Figura 6. Diagrama de difracción identificado de TVOC0.

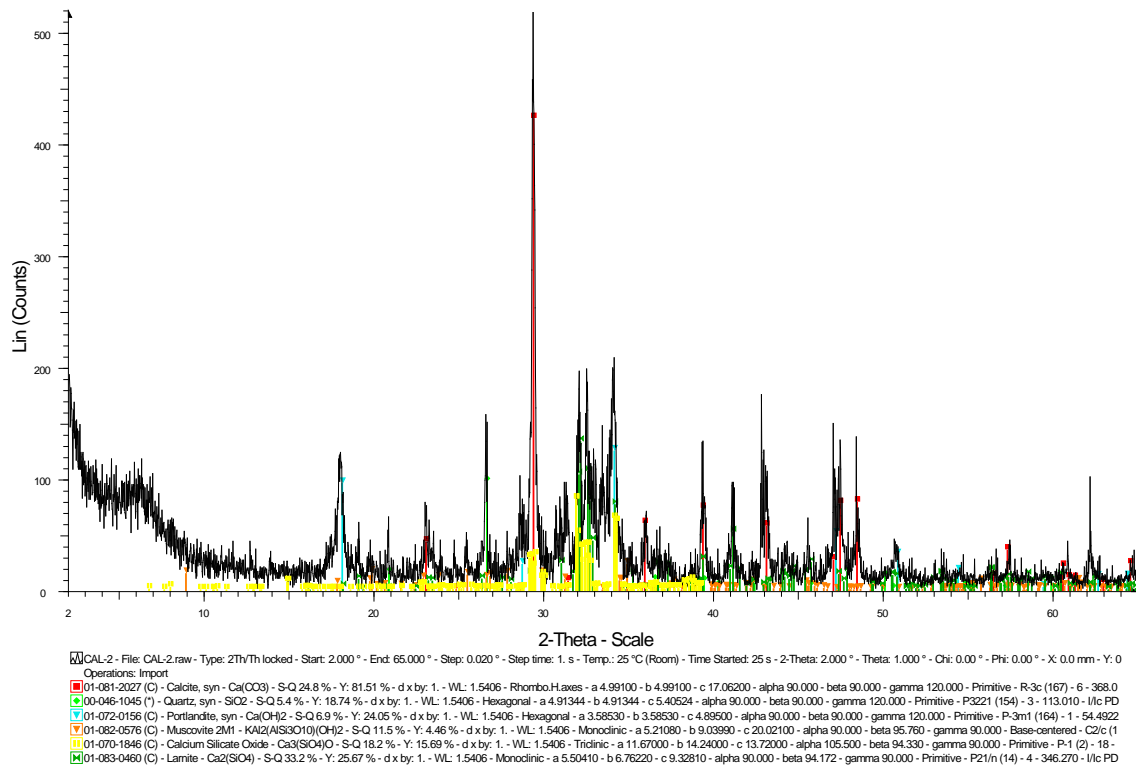


Figura 7. Diagrama de difracción identificado de CAL-2.

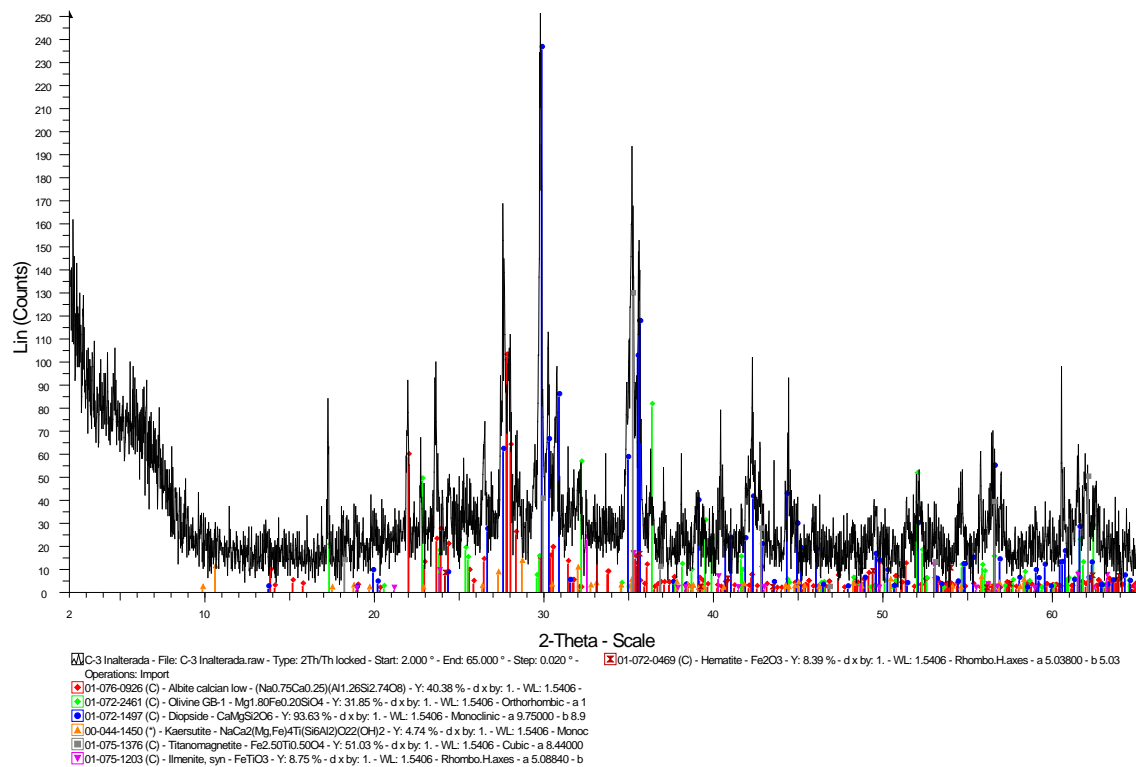


Figura 8. Diagrama de difracción identificado de la ceniza volcánica C-3.

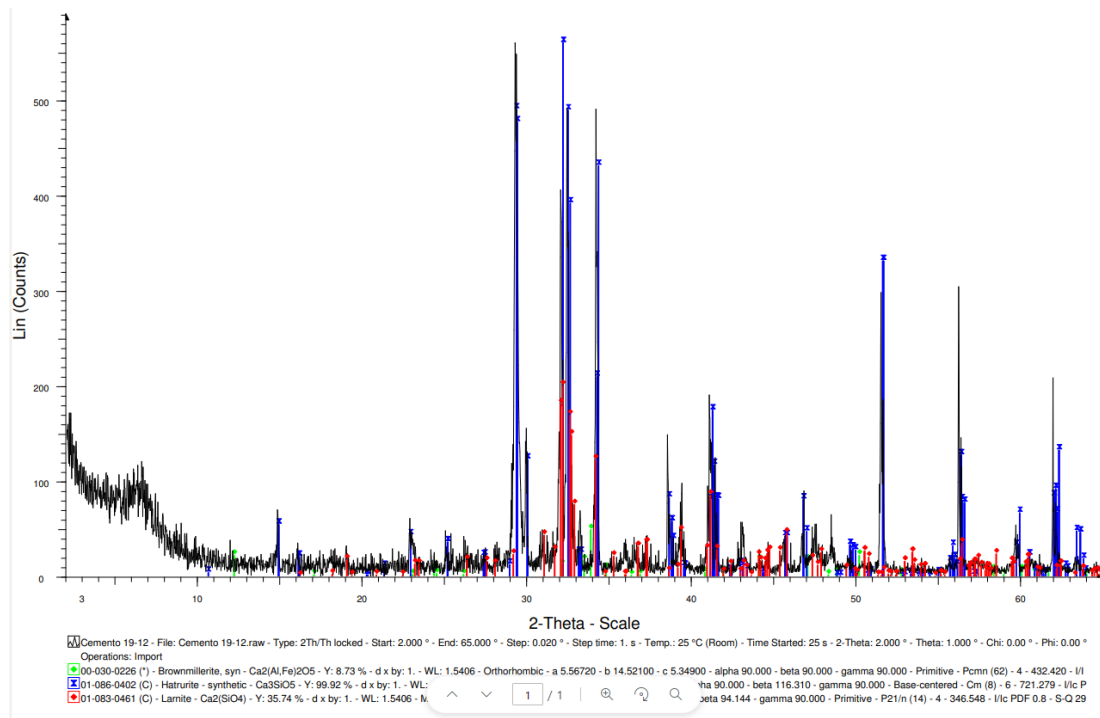


Figura 9. Diagrama de difracción identificado del cemento.

Tabla VIII. Semicuantificación de fases cristalinas mediante DRX de la muestra natural y los tres binders utilizados.

Ficha pdf	Fases cristalinas	Fórmula	TV0C0	CAL	C-3	CEM
00-046-1045	Cuarzo	SiO ₂	14,5	5,4		
01-076-0926	Plagioclasa	(NaCa)Al ₂ Si ₂ O ₈	4,4		33,6	
01-075-1190	Feldespato potásico	K(AlSi ₃)O ₈	5,1			
01-082-0576	Minerales de la arcilla	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	36,7	11,5		
01-072-2461	Olivino	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄			18,6	
01-072-1497	Dióxido (Px)	MgCaSi ₂ O ₆			36,5	
00-044-1450	Kaerstutita (Anf)	{Na}{Ca ₂ }{Mg ₃ AlTi}{Al ₂ Si ₆ O ₂₂ }O ₂			3,5	
01-086-0402	Hatrurita/Alita (C3S)	Ca ₃ SiO ₅		18,2		66,7
01-083-0461	Larnita/Belita (C2S)	Ca ₂ (SiO ₄)		33,2		29,2
00-030-0311	Brownmillerita/Felita (C4AF)	Ca ₂ (Al,Fe) ₂ O ₅				4,1
00-033-0311	Yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O	3,1			
01-070-1813	Alunógeno	Al ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₁₂ ·5H ₂ O	5,5			
01-072-1214	Calcita	CaCO ₃	26,9	24,8		
00-036-0426	Dolomita	CaMg(CO ₃) ₂	3,9			
01-072-0156	Portandita	Ca(OH) ₂		6,9		
01-075-1376	Ti-Magnetita	Fe(FeTi)O ₄			5,2	
01-075-1203	Ilmenita	FeTiO ₃			1,4	
01-072-0469	Hematites	Fe ₂ O ₃			1,3	

En la muestra de arcilla natural (TV0C0), la fase cristalina mayoritaria son los filosilicatos con un 37%, debido al alto contenido de estos se hace necesario la identificación de estos mediante agregados orientados (AO).

En la figura 10 se representan los difractogramas de AO y en la tabla IX la cuantificación de los minerales de la arcilla.

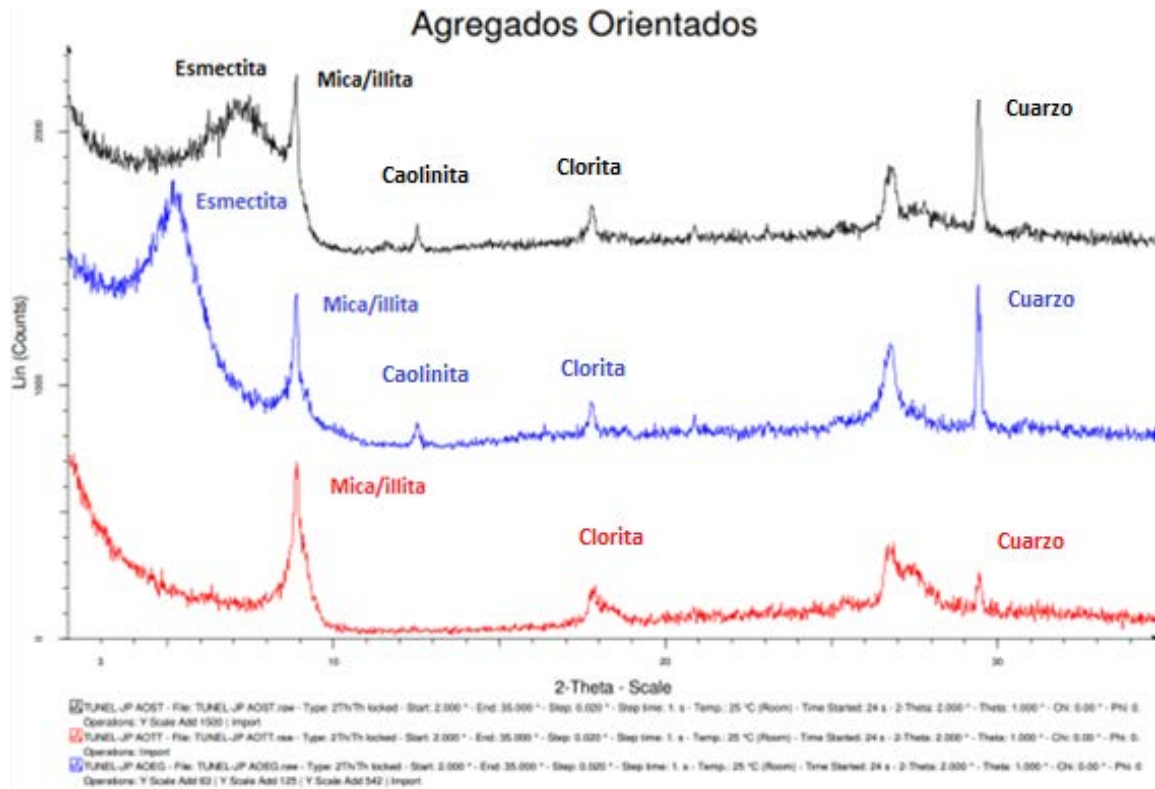


Figura 10. Difractogramas de agregados orientados de la muestra base TV0C0.

Tabla IX. Cuantificación de los minerales de la arcilla de la muestra TV0C0.

Fases cristalinas	Intensidad en cuentas	Muestra TV0C0 (%)
Esmeclita	829	60,90
Mica/illita	124	36,39
Clorita	9	1,35
Caolinita	9	1,35

La fase más abundante de la fracción arcilla en la muestra TV0C0 es esmeclita, con un porcentaje cercano al 61%, seguido de mica/illita con un 36%.

4.3 Fluorescencia de rayos X (FRX)

El análisis químico realizado mediante FRX de la muestra natural y de los aditivos utilizados se recogen en la tabla X.

Tabla X. Resultados del ensayo de fluorescencia de rayos X.

Formula	EQUA-OXIDES			
	C-3	CAL	CEMENTO	TV0C0
	(22120-04)	(23096-01)	(23096-02)	(23096-04)
	Conc.	Conc.	Conc.	Conc.
CaO	13,43%	64,99%	76,33%	36,88%
SiO ₂	40,62%	15,75%	15,04%	34,67%
MgO	5,80%	5,60%	0,50%	2,90%
Al ₂ O ₃	13,71%	4,87%	2,73%	11,77%
Fe ₂ O ₃	15,55%	2,42%	0,20%	5,24%
SO ₃	0,33%	1,84%	2,87%	1,31%
K ₂ O	1,89%	1,76%	0,78%	2,69%
Na ₂ O	3,20%	0,70%	0,30%	0,60%
SrO	0,15%	0,27%	0,03%	0,10%
TiO ₂	4,09%	0,23%	-	0,58%
Cl	0,19%	0,09%	0,06%	0,48%
MnO	0,08%	0,02%	-	0,04%
SnO ₂	-	-	0,01%	-
ZrO ₂	0,05%	-	-	0,02%
P ₂ O ₅	0,64%	-	-	0,06%
Cr ₂ O ₃	0,09%	-	-	0,01%
V ₂ O ₅	0,07%	-	-	-
ZnO	0,01%	-	-	-
NiO	0,01%	-	-	-
CuO	0,01%	-	-	-
LOI	0,08%	1,46%	1,15%	2,65%
	100%	100,00%	100%	100%

Tal y como se aprecia en la tabla, el elemento dominante en las 3 muestras es el calcio, el cual constituye expresado en óxido, un 65% de la muestra de cal, un 76% de la muestra de cemento y un 37% de la muestra de arcilla yesífera de Murcia, el resto de los elementos dominantes son el silicio en las 4 muestras, el magnesio en la muestra de cal, el aluminio y el hierro en las muestras de ceniza volcánica y arcilla yesífera de Murcia. y el hierro expresado en óxido en la muestra de arcilla yesífera de Murcia.

4.4 Límites de Atterberg

Se han realizado un total de 8 ensayos de límites de Atterberg, uno de ellos corresponde a la muestra en su estado natural, el resto corresponden a las distintas mezclas que se han

utilizado a lo largo del estudio, tres de ellas formadas por la muestra natural con distintos porcentajes de cal (1, 3 y 5%), y la última mezclada con 1% de cemento.

El objetivo es calcular los índices de plasticidad para cada muestra y observar si aumenta, se reduce o se mantiene dicho parámetro, el cual es directamente proporcional a la expansividad de la muestra.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en la Tabla XI y en la Figura 11, reportándose los golpes realizados en el ensayo de la cuchara de Casagrande en el eje X y los valores de humedad en el eje Y a modo de justificación de los resultados obtenidos.

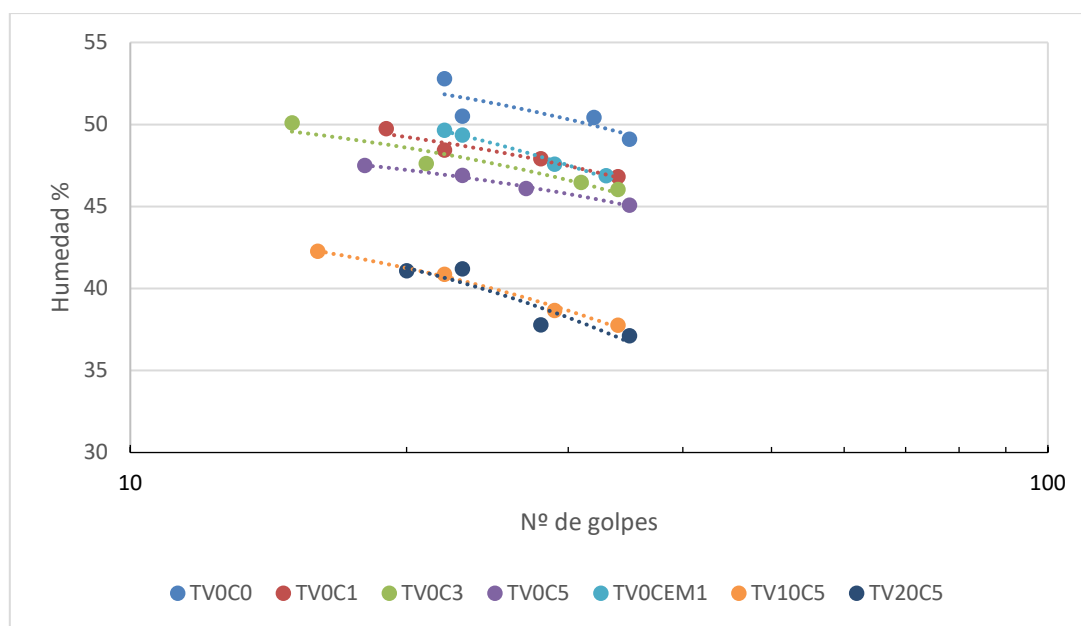


Figura 11. Gráfico que relaciona el nº de golpes en escala logarítmica y la humedad obtenida del ensayo de la cuchara de Casagrande.

Tabla XI. Resultados del ensayo de límites de Atterberg y el grado de expansividad de las distintas mezclas según Chen (1988) y Holtz y Gibbs (1956).

	Limite líquido LL (%)	Limite plástico LP (%)	Índice de plasticidad IP (%)	Grado de expansividad según Chen (1988)	Grado de expansividad según Holtz y Gibbs (1956)
TV0C0	51,604	18,064	33,540	Alto	Alto
TV0C1	48,22	19,85	28,37	Alto	Alto
TV0C3	47,29	23,4	23,89	Alto	Medio
TV0C5	46,38	23,94	22,44	Alto	Medio
TV0CEM1	48,36	20,31	28,05	Alto	Alto
TV10C5	39,88	13,69	26,19	Medio	Medio
TV20C5	39,52	16,83	22,68	Medio	Medio

Tal y como se aprecia en la tabla el índice de plasticidad de la muestra TV0C0 es de 33,540%, la cal muestra una mejoría notable reduciendo dicho valor hasta obtener un valor de 22,44% utilizando una mezcla con un 5% de cal.

Anteriormente, se han presentado las propuestas de Chen (1998) y Holtz & Gibbs (1956), (Tablas IV - V) en el apartado 2.2, donde se han correlacionado los valores del límite líquido (LL) y del índice de plasticidad (IP) con el grado de expansividad esperable en un terreno, obteniendo como resultado que el grado de expansividad esperable para las arcillas de este estudio es alto. Las mezclas TV0C1 y TV0CEM1 también tienen un grado de expansividad esperable alto, el resto de las mezclas en cambio, logran reducir el grado de expansividad esperable a medio.

Al introducir los resultados de cada mezcla en la carta de plasticidad de Casagrande (Figura 1) obtenemos la nomenclatura de cada mezcla.

- Las muestras TV0C0 y TV0C1 se clasifican como CH, arcillas de alta plasticidad
- Las muestras TV0C3, TV0C5, TV0CEM1, TV10C5 y TV20C5 se clasifican como CL, arcillas de plasticidad baja y media.

4.5 Peso específico

Se han realizado un total de 9 ensayos de picnómetro de agua para determinar el peso específico, uno de ellos con la muestra natural remoldeada, el resto corresponden a las distintas mezclas que se han utilizado a lo largo del estudio, tres de ellas formadas por la muestra natural remoldeada con distintos porcentajes de cal (1, 3 y 5%), otras tres están formadas por la muestra natural remoldeada con distintos porcentajes de ceniza volcánica (10, 20 y 30%) y en base al peso de ceniza volcánica utilizada se ha añadido un 5% de cal, una mezcla está formada por la muestra natural remoldeada con 1% de cemento añadido, la última muestra está compuesta únicamente por ceniza volcánica.

El objetivo es poder observar en las mezclas una mejora en cuanto al peso específico de partículas sólidas con respecto a la muestra en su estado natural.

En la Tabla XII se muestran los resultados del peso específico de las muestras. El valor de peso específico de la muestra TV0C0 es de 2,59, la mayoría de las mezclas reducen dicho valor hasta 2,53 en las mezclas de 3% de cal y de 1% de cemento, obteniendo los mejores resultados en cuanto a la reducción del peso específico de la muestra.

Tabla XII. Resultados de los ensayos del picnómetro de agua.

	Peso específico de partículas solidas
TV0C0	2,59
TV0C1	2,57
TV0C3	2,54
TV0C5	2,53
TV0CEM1	2,56
TV10C5	2,61
TV20C5	2,63
TV30C5	2,64
CENIZA C3	2,95

Cabe destacar que el cemento no se puede utilizar como aditivo para la muestra TV0C0 debido al alto contenido en yeso de esta, ya que la presencia de yeso bloquea el fraguado del cemento inhibiendo su papel como estabilizador según el Manual de estabilización de suelos con cemento y cal (IECA, 2008), por lo tanto, teniendo en cuenta solamente los resultados del ensayo de peso específico, la muestra que muestra una mayor mejoría es la que utiliza como aditivo un 3% de cal.

4.6 pH y conductividad

Se ha realizado la determinación de pH y conductividad, para la muestra en su estado natural. Los resultados se muestran en la Tabla XIII:

Tabla XIII. pH y conductividad de la muestra TV0C0.

	pH	Conductividad (mS/cm)
TV0C0	7,67 ± 0,08	2,7 ± 0,2

El pH de la muestra es próximo a 7, por lo tanto, se trata de un suelo neutro, en cuanto a la conductividad, los valores están en el rango de 1,6 – 3,0 (mS/cm) que son valores altos de conductividad.

Tal y como se incide en la Tabla VII donde se clasifican los suelos según su pH, el suelo estudiado es un suelo neutro.

4.7 Proctor

Se han realizado ensayos proctor con la muestra en su estado natural y con 5 mezclas diferentes, tres de ellas formadas por la muestra natural con distintos porcentajes de cal (1, 3 y 5), la última en cambio, en lugar de estar mezclada con cal está mezclada con 1% de cemento. En cada mezcla se han utilizado 5 probetas distintas, para deducir las correlaciones

El objetivo es poder determinar si se aprecia una mejora en la densidad máxima y/o una reducción en la humedad óptima para diferentes binderes aplicados al suelo natural remoldeado.

Los resultados se presentan en la Tabla XIV y en la Figura 12.

Tabla XIV. Resultados de los ensayos proctor.

	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (kN/m ³)
TV0C0	19,677	16,80 kN /m ³
TV0C1	17,265	17,19 kN /m ³
TV0C3	19,400	17,00 kN /m ³
TV0C5	18,447	17,11 kN /m ³
TV0CEM1	17,217	17,56 kN /m ³
TV10C5	14,775	18,76 kN /m ³

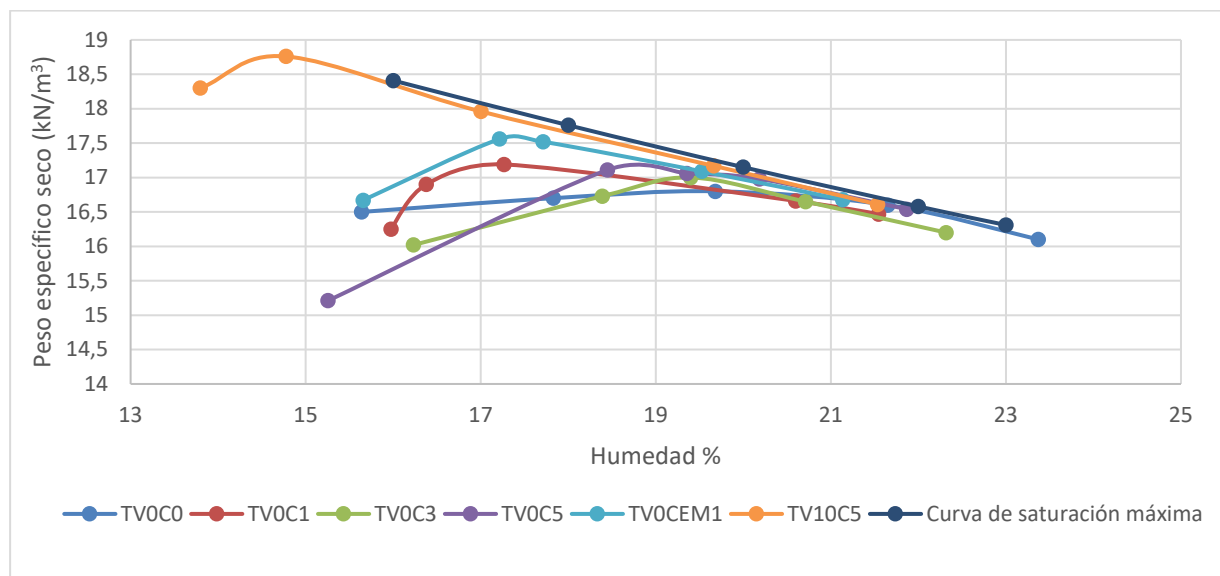


Figura 12. Resultados gráficos del ensayo proctor de cada muestra y representación de la curva de máxima saturación para la muestra natural remoldeada.

Solo se ha representado la curva de máxima saturación de la muestra natural remoldeada debido a que los valores deducidos del peso específico de partículas sólidas son similares.

Tal y como se aprecia en la gráfica, todas las muestras presentan una mejora, respecto a la compactibilidad, aumentando la densidad máxima y reduciendo la humedad óptima. La mezcla que muestra una mayor mejoría es TV10C5 con un valor de densidad máxima de 18,76 kN/m³ y una humedad óptima del 14,775%, la segunda mejor mezcla es TV0CEM1, pero, cabe destacar que el cemento no se puede utilizar como aditivo para la muestra TV0C0 debido a su alto contenido en yeso, el yeso bloquea el fraguado del cemento inhibiendo su papel como estabilizador, según el Manual de estabilización de suelos con cemento y cal (IECA, 2008).

Las otras dos muestras que presentan una gran mejoría son TV0C1, obteniendo como resultado una densidad máxima de 17,19 kN/m³ y una humedad óptima del 17,265%, y TV0C5, obteniendo como resultado 17,11 kN/m³ y una humedad óptima del 18,447%.

4.8 Edómetro

Se han realizado un total de 10 ensayos edométricos, uno de ellos con la muestra en su estado natural remoldeado, una muestra de ceniza en su estado más flojo y 8 ensayos con mezclas distintas realizadas con diversos porcentajes de cal, cemento y cenizas volcánicas en combinación con cal como activador.

En la Tabla XV se muestran los parámetros de hinchamiento libre (expansividad %), de la cura edométrica y de la curva de consolidación de cada escalón de carga.

Tabla XV. Valores de diferentes parámetros deducidos de los ensayos edométricos sobre diferentes muestras.

	Expansividad (%)	Humedad inicial (%)	Módulo edométrico (MPa)	Módulo de descarga (MPa)	Cc	Cs	av (m ² /kN)	mv (m ² /kN)
TV0C0	11,894	17,66	13,50	20,68	0,201	0,05	0,000074	0,00005
TV0C1	7,794	17,73	16,27	26,71	0,210	0,06	0,000079	0,000052
TV0C3	1,075	19,70	17,65	27,92	0,115	0,02	0,000014	0,0000100
TV0C5	1,108	18,68	15,80	31,22	0,214	0,01	0,00008	0,00005
TV0CEM1	2,565	17,28	22,06	35,34	0,15	0,05	0,000061	0,00004
TV0CEM3	1,761	18,47	18,37	36,30	0,19	0,01	0,000075	0,00005
TV10C5	3,464	18,92	18,96	36,86	0,173	0,03	0,000068	0,00005
TV20C5	1,413	19,51	21,57	41,30	0,154	0,01	0,000058	0,00004
TV30C5	0,526	19,16	21,57	39,05	0,153	0,01	0,000057	0,00004
CENIZA C3	0,004	0	37,20	57,45	0,053	0,00	0,000022	0,00002

A la hora de preparar las probetas hubo dificultades, debido a que no se ha logrado obtener la misma humedad para todas las mezclas, por lo tanto, las conclusiones sobre la reducción de la expansividad obtenida no es la óptima.

Los resultados obtenidos muestran un aumento considerable en cuanto al módulo edométrico y módulo de descarga, obteniendo los mejores resultados con la mezcla TV20C5, con valores de 21,57 MPa y 41,30 MPa respectivamente, siendo similares a los de la mezcla TV30C5. Las muestras de cal muestran un valor máximo de módulo edométrico de 19,70 MPa y un módulo de descarga de 27,92 MPa en la muestra TV0C3, la muestra TV0C5 muestra un valor inferior de módulo edométrico y un valor superior de módulo de descarga, lo cual puede deberse a las complicaciones que han surgido al no lograr obtener el mismo valor de humedad inicial para todas las muestras.

Respecto a los valores de Cc y Cs, los mejores resultados se obtienen con la muestra TV30C5, reduciendo sus valores hasta 0,153 de Cc y 0,01 de Cs. Las muestras de cal presentan resultados confusos debido a que solo se reducen dichos valores en la muestra TV0C3, lo cual puede deberse a las complicaciones que han surgido al no lograr obtener el mismo valor de humedad inicial para todas las muestras.

Las muestras de cemento muestran resultados positivos, pero, el cemento no se puede utilizar como aditivo para la muestra TV0C0 debido a su alto contenido en yeso, el yeso bloquea el fraguado del cemento inhibiendo su papel como estabilizador, según el Manual de estabilización de suelos con cemento y cal (IECA, 2008).

En la Figura 13 aparecen representadas las curvas de hinchamiento libre de las distintas mezclas diferenciadas por colores, el objetivo es poder determinar las variaciones de expansividad de cada muestra, para poder deducir la efectividad de tratamiento con diferentes binderes.

Tal y como se puede apreciar en la Figura 13 y en la Tabla XV el valor de hinchamiento libre inicial de la muestra es del orden del 11,9%, dicho valor junto al obtenido en los resultados de los límites de Atterberg, confirman que el potencial de expansividad de la muestra TV0C0 es muy alto, motivo por el cual se clasifica como material inadecuado según la clasificación expuesta en la Tabla I. Cada mezcla mejora notoriamente el potencial de expansividad de la muestra, obteniendo resultados muy buenos con las mezclas TV30C5, TV20C5, TV0C3 y TV0C5, los cuales reducen dicho valor hasta 0,5%, 1,5% 1,07% y 1,1% respectivamente, con dichos valores el material se clasificaría como adecuado según la clasificación expuesta en la Tabla I, por lo tanto, se puede confirmar la eficacia de dichos binderes en cuanto a la expansividad de la muestra natural remoldeada.

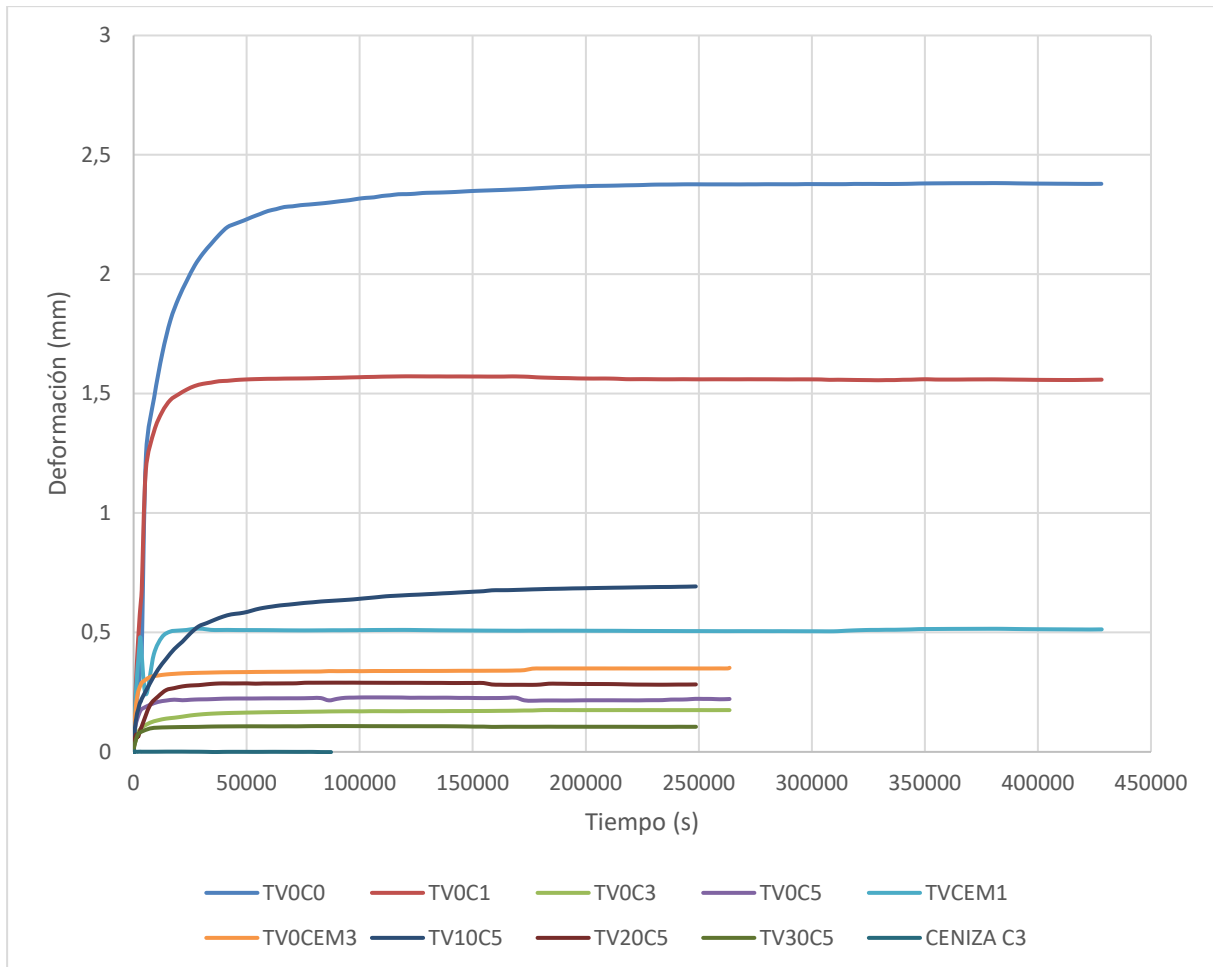


Figura 13. Curvas de Hinchamiento libre de las 10 muestras y mezclas analizadas.

En la Figura 14 se muestran las curvas de compresibilidad, en la cual se enfrentan los valores del índice de poros en el eje Y expresado como e_n/e_0 siendo e_n los valores del índice de poros obtenidos al final de cada escalón de carga y e_0 el valor de índice de poros inicial, y en el eje X los valores de esfuerzo aplicado en cada escalón en KPa expresado en escala logarítmica. Se han diferenciado las distintas muestras por colores con el objetivo de poder determinar las variaciones del índice de poros de cada muestra.

En la Figura 15 se muestra la deformación resultante de cada muestra en todos los escalones de carga del ensayo edométrico, donde se puede apreciar que la muestra que ha sufrido el mayor asiento es TV0C0, en cambio, las muestras que han sufrido un menor asiento, y por lo tanto reducen considerablemente el asiento de la muestra TV0C0, son CENIZA C3, TV0CEM3, TV0C5 y TV0CEM1 respectivamente,

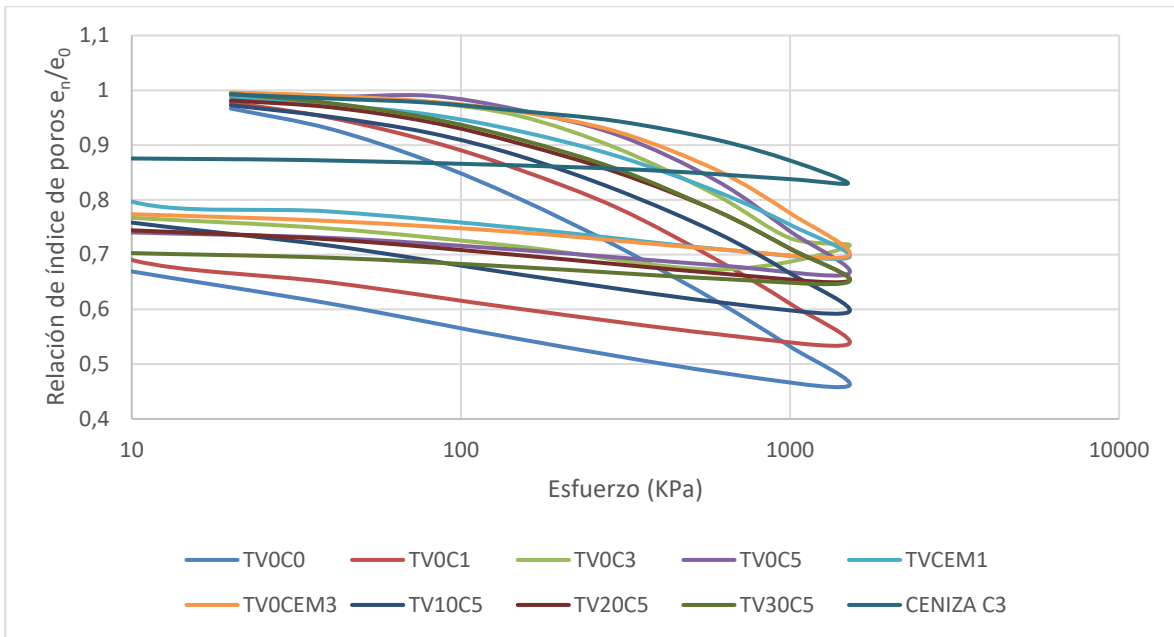


Figura 14. Curva de compresibilidad de los 10 edómetros realizados.

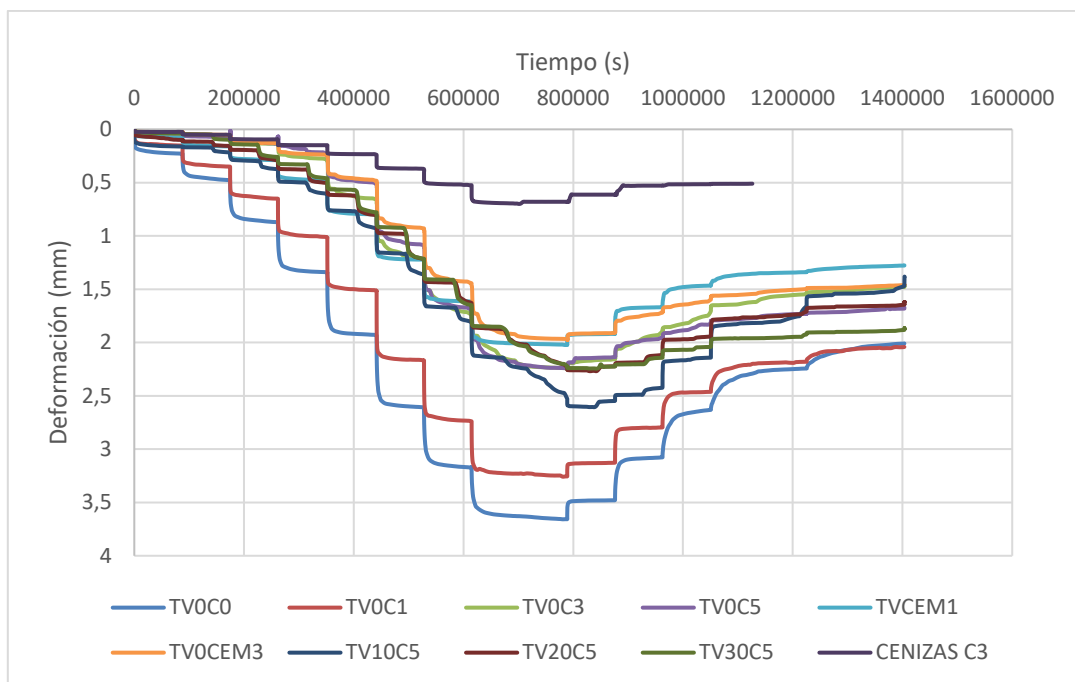


Figura 15. Curva que relaciona los valores de deformación (mm) y tiempo (s) obtenidos durante el ensayo edométrico para los 10 edómetros realizados

Se aprecia una reducción del índice de poros con cada una de las mezclas respecto a la muestra sin aditivos (TV0C0), obteniendo los mejores resultados en las muestras TV0CEM3, TV0C3 y TV20C5 en relación a la reducción del índice de poros inicial de hasta el 13%.

Respecto a la deformación sufrida por las muestras, la probeta TV0C0 sufre una deformación vertical máxima de 3,6 mm, dicho valor es igual al 19% de la altura inicial de la probeta, en

cada una de las mezclas se puede ver una mejoría, obteniendo una reducción en la deformación vertical de 1,5 mm en las muestras TV0CEM3, TV20C5, TV30C5 y TV0C5.

4.9 Corte directo

Se han realizado ensayos de corte directo para 4 mezclas distintas, con cada muestra se ha realizado 4 ensayos, aplicando distintas tensiones normales en cada uno de ellos, 50, 100, 200 y 400 kPa.

Debido a las limitaciones de tiempo para el uso de equipos de laboratorio de corte directo no se han realizado ensayos de corte directo para todas las mezclas, se han seleccionado las siguientes, TV0C0, TV0C3, TV20C5 y TV30C5 por los siguientes motivos:

- Se han elegido las muestras que reducen de manera significativa el hinchamiento del material natural remoldeado TV0C0 determinado mediante los ensayos edométricos. Las muestras TV0C3, TV20C5 y TV30C5 se han elegido para su comparación dado que se ha considerado la reducción suficiente de hinchamiento libre.
- Las mezclas de cemento no se han estudiado debido a que el cemento no se puede utilizar como aditivo para la muestra natural debido a su alto contenido en yeso, dado que el yeso bloquea el fraguado del cemento inhibiendo su papel como estabilizador, según el Manual de estabilización de suelos con cemento y cal (IECA, 2008).

El objetivo del ensayo es calcular los valores de los parámetros resistentes, de cohesión y de ángulo de rozamiento en rotura para cada una de las mezclas, y así poder determinar si ha habido una mejora en la calidad de la muestra natural. Los resultados de los parámetros resistentes se muestran en la Tabla XVI. A modo de justificación, se han representado los resultados en forma de envolvente en rotura en términos de tensión normal (kPa) y tensión tangencial (kPa) en rotura de cada mezcla en la Figura 16.

Tabla XVI. Parámetros resistentes obtenidos de los ensayos de corte directo.

	TV0C0	TV0C3	TV20C5	TV30C5	CENIZA C3
Cohesión (valor pico) (kPa)	25,8	48,0	33,9	35,87	32,46
Cohesión (valor residual) (kPa)	15,2	41,3	30,7	32,50	27,26
Ángulo de rozamiento (valor pico)	35,5°	35,84°	36,1°	38,8°	43°
Ángulo de rozamiento (valor residual)	30,1°	31,5°	32,7°	32,8°	41°

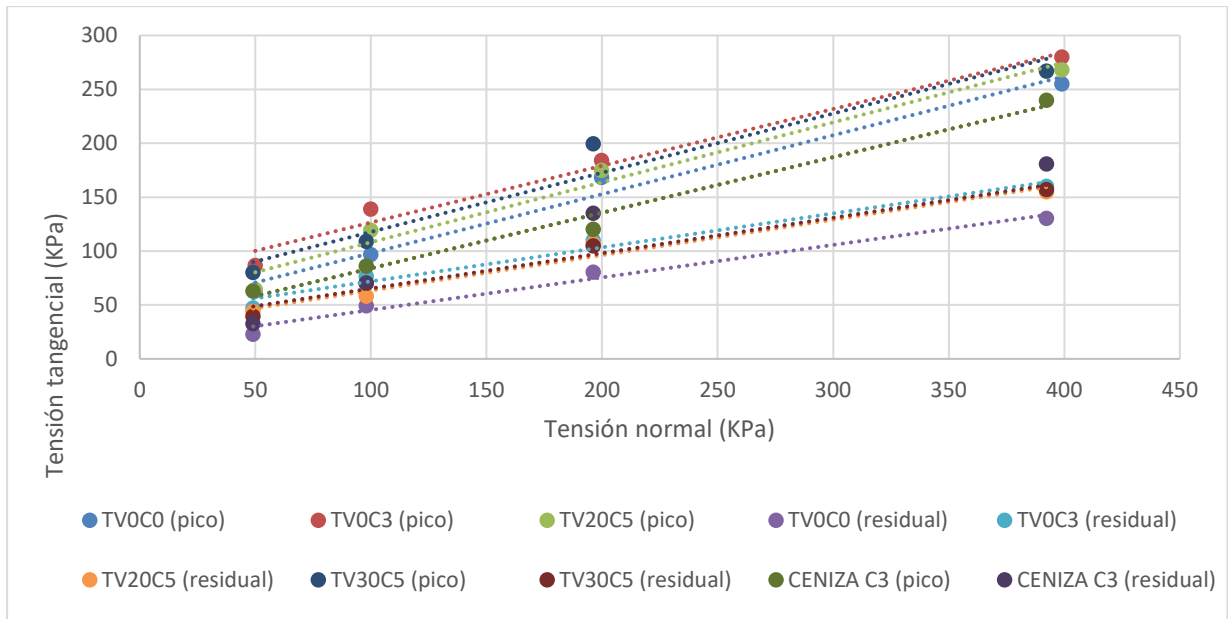


Figura 16. Correlación de tensión normal (kPa) y tensión tangencial (kPa) en rotura para cada mezcla

Tal y como se aprecia en los valores representados en la tabla XVI el ángulo de rozamiento de las distintas muestras es similar, pudiendo decir que no se observa variación. En cambio, en los valores obtenidos de cohesión se observa una mejora de hasta muy notable en la muestra TV0C3. La muestra de ceniza volcánica TV20C5 muestra una mejoría notable en cuanto a la cohesión, y aumenta significativamente en la muestra TV30C5.

En las Figuras 17 a 24 se presenta el comportamiento de las muestras, relacionando los valores de deformación vertical (mm) – deformación horizontal (mm) y tensión tangencial (KPa) – deformación horizontal (mm),

En las Figuras 17 a 20, se puede ver el comportamiento dilatante o comportamiento contractante de las muestras al aplicarles distintas tensiones. Cuando se aplica una tensión más baja de 50 kPa, solo la muestra TV0C0 muestra un comportamiento contractante al inicio, seguido de comportamiento dilatante, mientras que las demás curvas representan el hinchamiento del material. Al aplicar una tensión de 100 kPa solo la muestra TV0C3 muestra un comportamiento dilatante. Al aplicar tensiones de 200 y 400 kPa, todas las muestras tienen comportamientos contractantes. Por lo tanto, se puede deducir que la muestra TV0C0 sufre de un comportamiento contractante con cargas de consolidación muy bajas, y que la muestra TV0C3 muestra un comportamiento dilatante hasta sufrir cargas de consolidación medias.

La muestra de CENIZAS C3 a mostrado un comportamiento dilatante en los cuatro ensayos realizados (50,100,200 y 400 kPa).

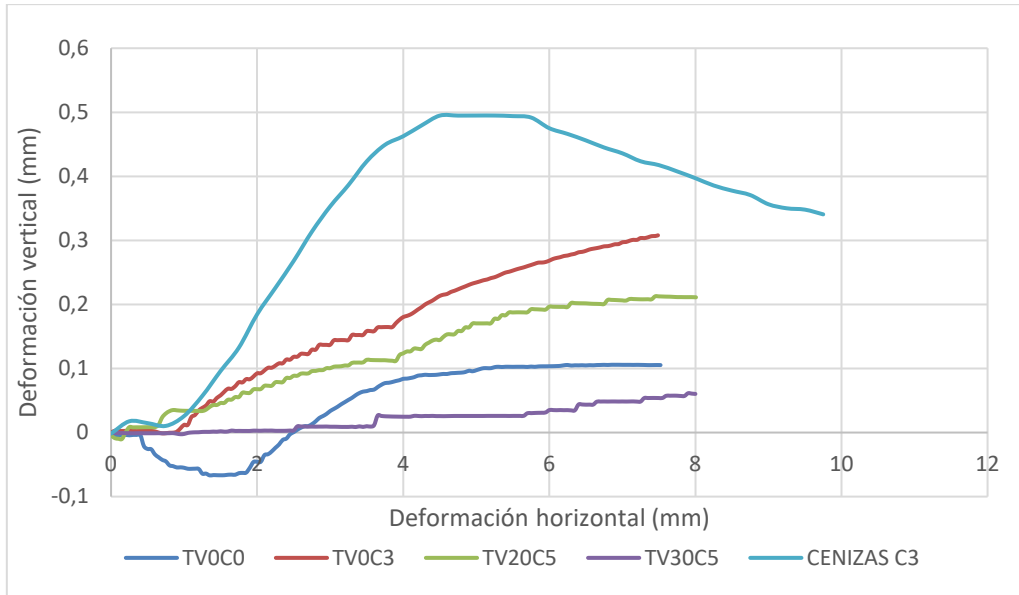


Figura 17. Curva que correlaciona los valores de deformación horizontal (mm) y deformación vertical (mm) en rotura para cada mezcla en los ensayos realizados con una tensión normal de 50 kPa.

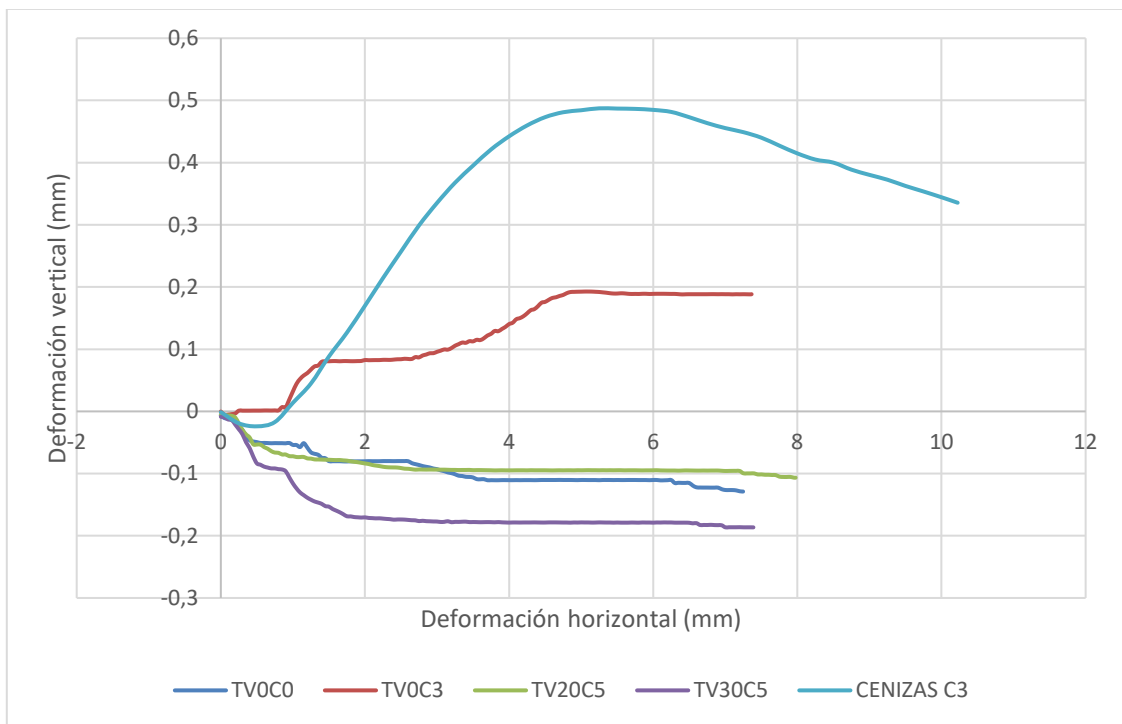


Figura 18. Curva que correlaciona los valores de deformación horizontal (mm) y deformación vertical (mm) en rotura para cada mezcla en los ensayos realizados con una tensión normal de 100 kPa.

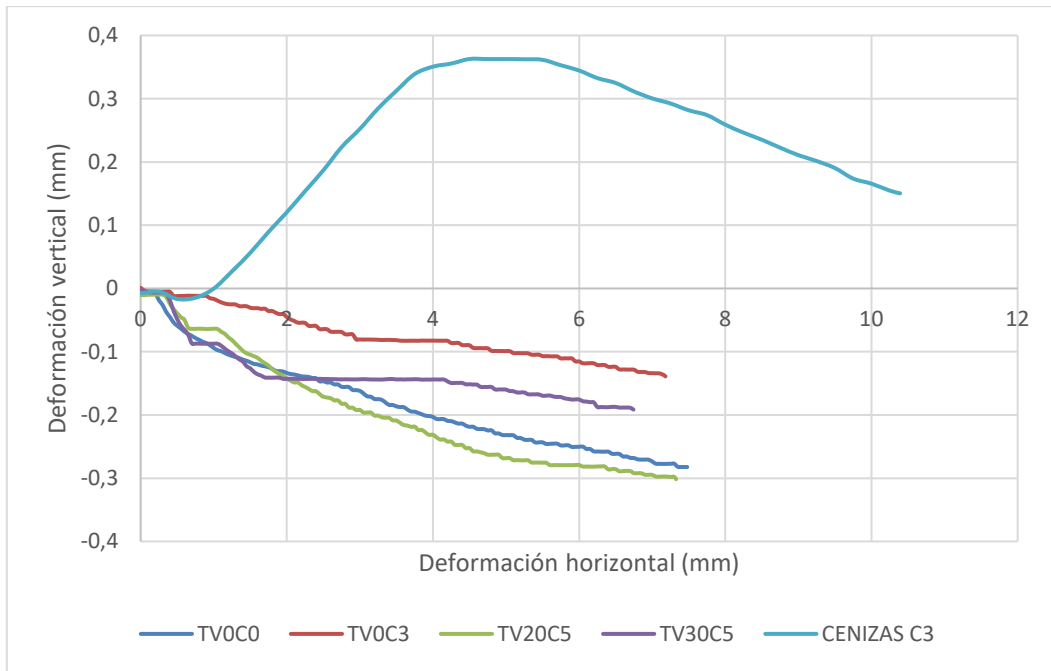


Figura 19. Curva que correlaciona los valores de deformación horizontal (mm) y deformación vertical (mm) en rotura para cada mezcla en los ensayos realizados con una tensión normal de 200 kPa.

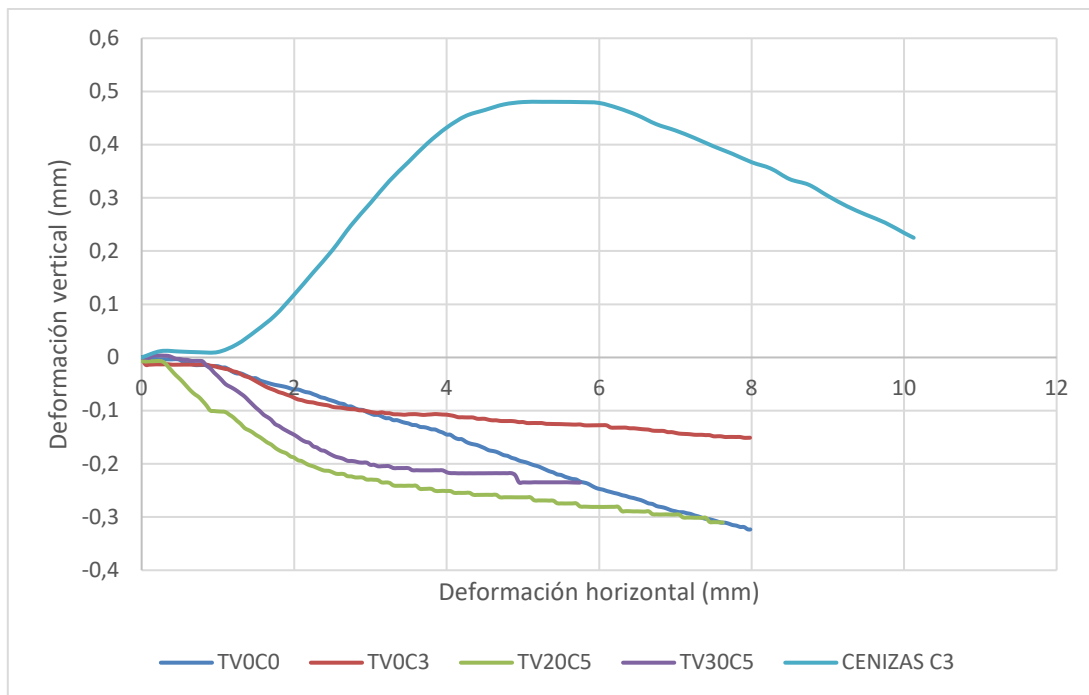


Figura 20. Curva que correlaciona los valores de deformación horizontal (mm) y deformación vertical (mm) en rotura para cada mezcla en los ensayos realizados con una tensión normal de 400 kPa.

En las Figuras 21 a 24 se representan las relaciones obtenidas para tensión tangencial con respecto a la deformación horizontal, y se puede observar el comportamiento pico y el comportamiento residual para diferentes tensiones normales, deduciendo los parámetros

resistentes pico y residual obtenidos de las Figuras 21 a 24, que están reflejados en la Tabla XVI.

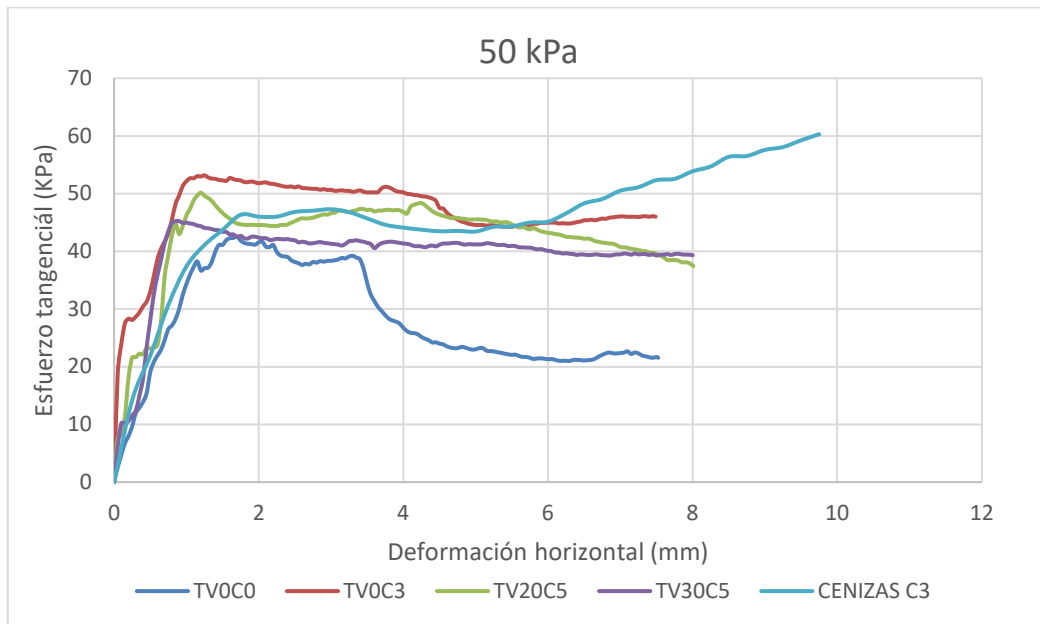


Figura 21. Curva que correlaciona los valores de tensión tangencial (kPa) y deformación horizontal (mm) en rotura para cada mezcla en los ensayos realizados con una tensión normal de 50 kPa.

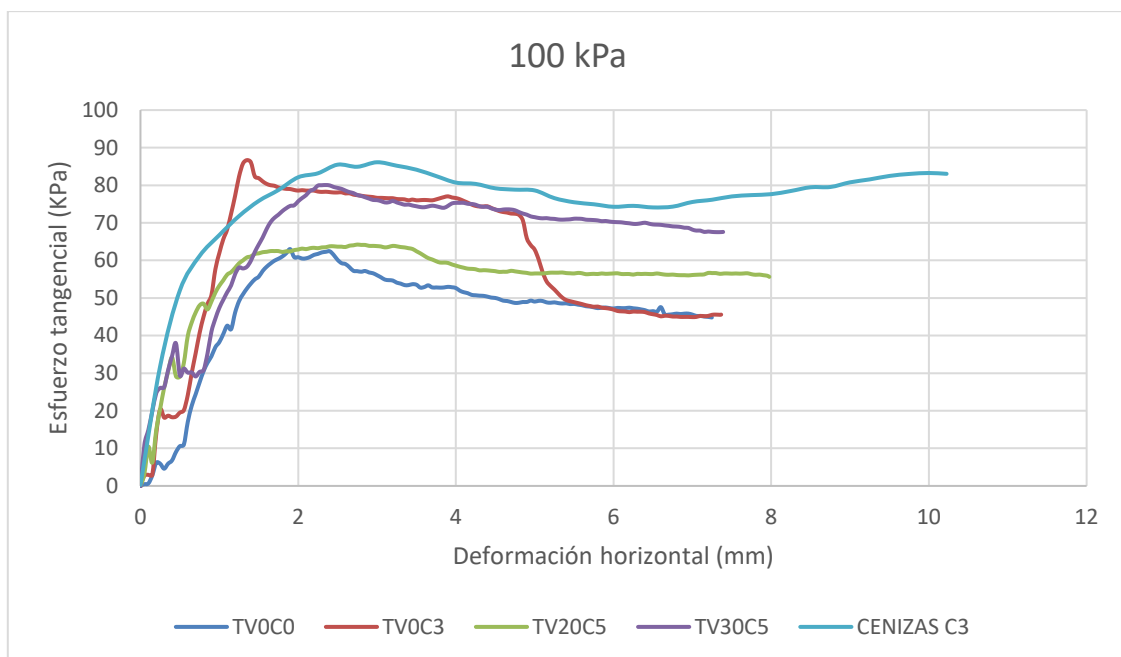


Figura 22. Curva que correlaciona los valores de tensión tangencial (kPa) y deformación horizontal (mm) en rotura para cada mezcla en los ensayos realizados con una tensión normal de 100 kPa.

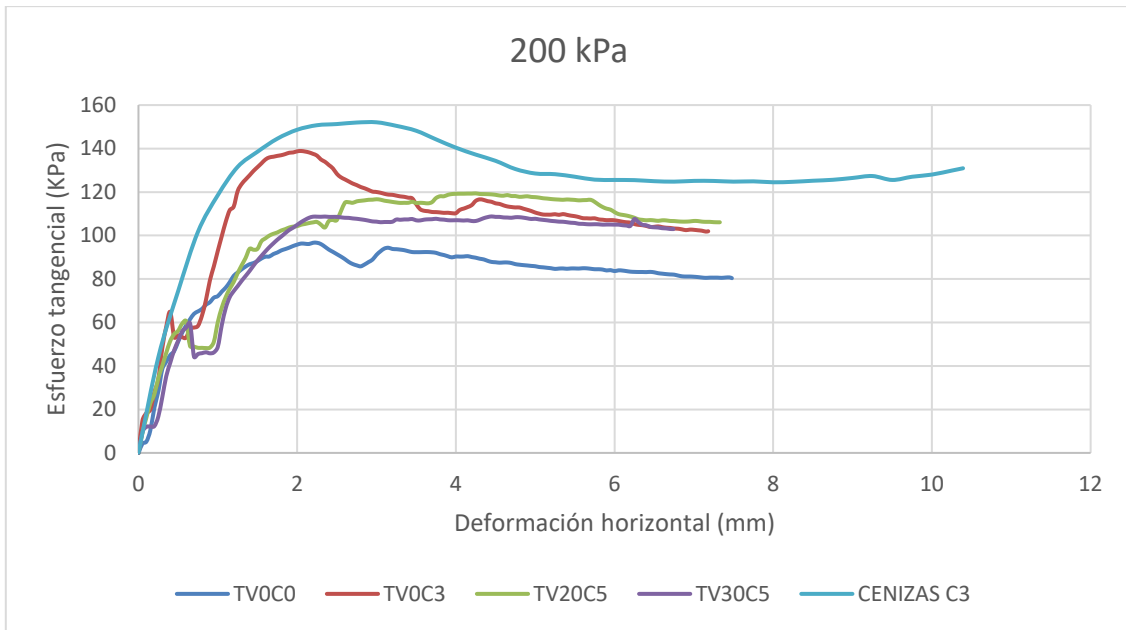


Figura 23. Curva que correlaciona los valores de tensión tangencial (kPa) y deformación horizontal (mm) en rotura para cada mezcla en los ensayos realizados con una tensión normal de 200 kPa.

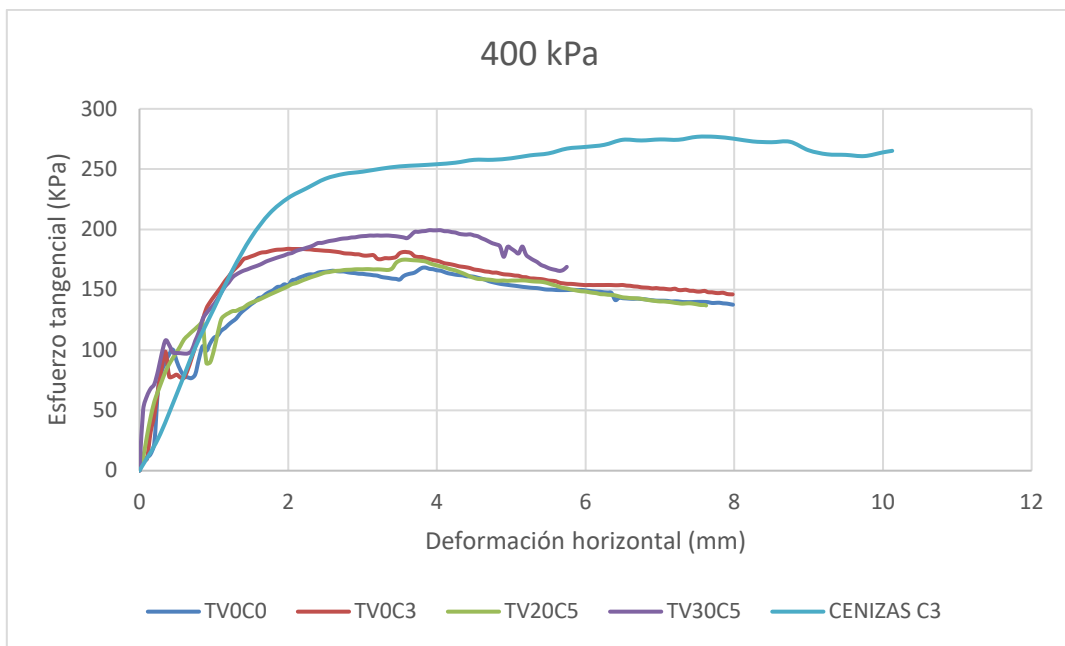


Figura 24. Curva que correlaciona los valores de tensión tangencial (kPa) y deformación horizontal (mm) en rotura para cada mezcla en los ensayos realizados con una tensión normal de 400 kPa.

5 CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha analizado un suelo problemático, procedente de Murcia, clasificado como arcillas yesíferas, y se ha mezclado con diferentes aditivos tipo cemento (las muestras denominadas TV0CEM1 y TV0CEM3), cal (las muestras denominadas TV0C1, TV0C3 y TV0C5) y ceniza volcánica (las muestras denominadas TV10C5, TV20C5 y TV30C5), con el objetivo de evaluar las propiedades de las mezclas resultantes en diferentes proporciones y determinar si estas mezclas muestran mejoría en cuanto a las propiedades geotécnicas, tales como reducción de su potencial expansivo, mejora de las propiedades en términos de resistencia de materiales, reducen su deformabilidad, etc.

Cabe destacar que a pesar de haber ensayado utilizando cemento como aditivo, este se considera que no se puede utilizar en obra debido a que, según el Manual de estabilización de suelos con cemento y cal (IECA, 2008) *“la formación de etringita, muy expansiva, puede llegar a romper las capas ya extendidas y compactadas cuando el contenido en sulfatos solubles es superior al 1%”*, es decir, el yeso afecta significativamente al funcionamiento del yeso, no permite las reacciones de hidratación del cemento evitando que cumpla su función como estabilizante, por lo tanto no cumple su función como estabilizante.

Ante los resultados mostrados se puede concluir:

- Mediante los resultados obtenidos de caracterización (DRX, FRX, granulometría y límites de Atterberg) se pueden confirmar los factores por los que el material es clasificado como material inadecuado, en base a los valores obtenidos de los límites de Atterberg, se puede confirmar que el grado de expansividad de la muestra es alto, además, mediante el ensayo de agregados orientados, se ha demostrado el motivo de la alta expansividad de las arcillas, obteniendo como resultado que el 61% de los minerales de la arcilla de la muestra base corresponden a la esmectita.
- Las mezclas de suelo con un porcentaje de cal superior al 1% (TV0C3 y TV0C5) presentan una significativa reducción en la plasticidad, dado los resultados obtenidos de límite líquido y límite plástico, además de un pequeño aumento de la densidad seca y reducción de la humedad óptima, de acuerdo con los resultados obtenidos del proctor, por lo tanto, se puede concluir que para que el material se pueda clasificar como adecuado de acuerdo con el PG-3, es necesario utilizar más de un 1% de cal.
- Las mezclas de suelo que tenían cenizas volcánicas y cal presentan una significativa reducción en plasticidad, del orden del 20% en cuanto al límite líquido y 9% en cuanto al índice de plasticidad, respecto a los resultados obtenidos en el ensayo proctor, han

mostrado los mejores resultados, obteniendo la menor humedad óptima, 15,9%, y la mayor densidad máxima, 18,49 kN/m³, por lo tanto, se puede concluir que al utilizar ceniza volcánica y cal como activador el material se puede clasificar como adecuado de acuerdo al PG-3.

- Las muestras en las que se ha utilizado cal como aditivo (TV0C1, TV0C3 y TV0C5) reducen considerablemente el carácter expansivo de la muestra, tal y como se puede ver en los resultados obtenidos del ensayo de hinchamiento libre y en el ensayo edométrico.
- Las muestras que tenían ceniza volcánica como aditivo presentan una mejora significativa en cuanto a la expansividad obtenida en el ensayo de hinchamiento libre, la muestra TV30C5 muestra una mejora de más del 10% en cuanto al carácter expansivo de la muestra base.
- Además, las muestras en las que se ha utilizado ceniza volcánica (TV10C5, TV20C5 y TV30C5) presentan una mejora en las condiciones de consolidación del terreno proporcional a la cantidad de aditivo que se ha aplicado en cada una, tal y como se puede ver en los resultados obtenidos del ensayo edométrico.
- La resistencia determinada mediante el ensayo de corte directo, evaluada mediante la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, presenta aumento significativo respecto a las propiedades resistentes en el caso de la muestra TV0C3 aumentando la cohesión respecto al suelo base en un 95%, aunque los valores del ángulo de rozamiento son similares. Respecto a los parámetros residuales, al igual que los valores pico, muestran una gran mejoría de más del 100% en cuanto a la cohesión, en cuanto al ángulo de rozamiento no dista mucho de los valores obtenidos para la muestra natural. Cabe destacar que la muestra TV0C3 muestra un comportamiento dilatante a bajas tensiones normales, de 50 kPa.
- Además, se puede concluir que las muestras estudiadas que contienen cal en una proporción superior al 1% tienen un efecto de mejora a corto y mediano plazo en las propiedades resistentes del suelo base TV0C0, pese a que no se han realizado ensayos de corte directo con la muestra TV0C5, se puede intuir que mejoraría las propiedades resistentes ya que en el resto de ensayos se puede apreciar como la mejora es proporcional a la cantidad de cal que tienen las muestras a las que se les aplicó este aditivo.

- La resistencia determinada mediante el ensayo de corte directo presenta un aumento significativo respecto a las propiedades resistentes en el caso de las muestras con cenizas volcánicas, observando un aumento en la cohesión de la muestra TV20C5, respecto al suelo base de un 32% y un aumento en la cohesión de la muestra TV30C5 respecto al suelo base de un 39%, aunque los valores del ángulo de rozamiento son similares.
- Respecto a los parámetros residuales deducidos del ensayo de corte directo, muestran una gran mejoría. Los valores de cohesión tanto en término pico como residual, para la muestra TV20C5 es similar, solo se reduce en un 8%, ocurre lo mismo para la muestra TV30C5. En cuanto al ángulo de rozamiento de las muestras TV20C5 y TV30C5 son superiores al del resto de mezclas, aumentando progresivamente a la cantidad de ceniza volcánica que tenga la muestra, pero no distan mucho del resto de mezclas.
- Cabe destacar que las muestras TV20C5 y TV30C5 muestran comportamiento dilatante para bajas tensiones normales, de 50 kPa, observado en base a los ensayos de corte directo.

6 BIBLIOGRAFÍA

Burland J., Chapman T, Skinner H., Brown M. (2012). ICE Manual of geotechnical engineering. Reino Unido: ICE publishing.

Carrasco J. (2013). Análisis de la acción de suelos expansivos sobre las estructuras en la región metropolitana. Métodos de estabilización y soluciones constructivas. Memoria de título Ingeniero Civil en obras civiles, Universidad de Santiago de Chile.

Chen F. (1975). "Fundamentals on Expansive Soils". Developments in Geotechnical Engineering 12. Denver, Colorado, USA.

Chen, F. H. (1988). Foundations on expansive soils. American Elsevier Science Publ., New York.

Chung, F.H. (1975). Quantitative interpretation of X-Ray diffraction patterns. III. Simultaneous determination of a set of reference intensities. Journal of Applied Crystallography, Vol.8, No.1, pp. 17-19, ISSN 0021-8898.

De Santiago C. (2022). "Propiedades físico-químicas de los suelos. Técnicas de análisis". Texto Máster en Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones 2022. Laboratorio de Geotecnia CEDEX.

Holtz, W.G., y Gibbs. H. J. (1956). Engineering properties of expansive clays. Transactions ASCE 121, 641-677.

Jiménez Salas J.A. y Justo Alpañes J.L. (1975). "Geotecnia y cimientos I". Editorial Rueda. Madrid.

MESCC 2018, "Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal". Editado por IECA, Madrid, España. 217 pp.

Moore, D.M. and Reynolds Jr., R.C. (1989). X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press, Oxford, 179-201.

Nelson J., Kuo Chieh Chao, Overton D., Nelson E. (2015). Foundation Engineering for Expansive Soils (Wiley).

Patrone J. y Prefumo J. (2002). "La acción de los suelos Expansivos sobre las cimentaciones. Métodos de prevención y control". UM Jornadas de Ing. De Cimentaciones. Uruguay.

Skempton, A. W. (1953). The colloidal activity of clays, *Proc. 3rd ICSMFE*, Zurich, 1, 57-61.

Środoń, Jan. (1984). X-ray Powder Diffraction Identification of Illitic Materials. *Clays & Clay Minerals*. 32. 337-349. 10.1346/CCMN.1984.0320501.

Tarback E., Lutgens F y Tasa D. (2015). "Ciencias de la Tierra, Una introducción a la geología física" 736 pp. Pearson Educación S. A., Madrid.

UNE 103-501 (1994):" Geotecnia. Ensayo de compactación. Proctor modificado", Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE 103 602 (1996):" Ensayo para calcular la presión de hinchamiento de un suelo en edómetro", Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-EN-15305 (2010):” Ensayos no destructivos. Método de ensayo para el análisis de la tensión residual por difracción de rayos X”, Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-EN ISO 10390 (2005):” Lodos, suelos y residuos biológicos tratados. Determinación del pH”, Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-EN ISO 1183-1 (2019):” Plásticos. Métodos para determinar la densidad de plásticos no celulares. Parte 1: Método de inmersión, método del picnómetro líquido y método de valoración”, Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-EN ISO 17892-8 (2019): “Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 8: Ensayo triaxial sin consolidación y sin drenaje”, Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-EN ISO 17892-10 (2019): “Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 10: Ensayos de corte directo”, Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-EN ISO 17892-12 (2019):” Investigación y ensayos geotécnicos. Ensayos de laboratorio de suelos. Parte 12: Determinación del límite líquido y del límite plástico”, Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-EN 933-2 (2022): “Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas”, Asociación Española de Normalización (UNE).

UNE-77308 (2001): “Calidad del suelo. Determinación de la conductividad eléctrica específica”, Asociación Española de Normalización (UNE).

Vijayvergiya, V.N. y Ghazzaly, O. I. (1973). Prediction of swelling potencial for natural clays. 3th International Conference on Expansive Soils, Haifa. Proc., Vol. I, pp. 227-236.