



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGÍA, INFRAESTRUCTURA E
TERRITORIO (ILATIT)**

**CENTRO INTERDISCIPLINAR DE
TECNOLOGÍA E INFRAESTRUCTURA
INGENIERÍA CIVIL DE INFRAESTRUCTURA**

**ESTABILIZACIÓN DE SUELO EXPANSIVO CON RESIDUOS RECICLADOS DE
MORTERO (RRM)**

BRYAN JOEL PAREJA RAMIREZ

Foz do Iguaçu
2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGÍA, INFRAESTRUCTURA E
TERRITORIO (ILATIT)**

**CENTRO INTERDISCIPLINAR DE TECNOLOGÍA E
INFRAESTRUCTURA INGENIERÍA CIVIL DE
INFRAESTRUCTURA**

ESTABILIZACIÓN DE SUELO EXPANSIVO CON RESIDUOS RECICLADOS DE MORTERO (RRM)

BRYAN JOEL PAREJA RAMIREZ

Trabajo de Fin de Grado presentado al Instituto Latinoamericano Tecnología, Infraestructura e Territorio de la Universidad Federal de Integración Latinoamericana, como requisito parcial para obtener el título de Bachiller en Ingeniería Civil de Infraestructura.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Winter de Mello

Coorientador: Prof. Ms.. Julio César Bizarreta Ortega

Foz do Iguazú
2025

BRYAN JOEL PAREJA RAMIREZ

**ESTABILIZACIÓN DE SUELO EXPANSIVO CON RESIDUOS RECICLADOS DE
MORTERO (RRM)**

Trabajo de Conclusión de Curso presentado al Instituto Latino-Americano Tecnología, Infraestructura y territorio de la Universidad Federal da Integración Latino-Americana, como requisito parcial a obtención do título de Bachiller en Ingeniería Civil de Infraestructura.

COMITÉ EXAMINADOR

Prof. Dr. ADRIANA ZEMIANI CHALLIOL
(UNILA)

Prof. Dr. NOE VILLEGAS FLORES
(UNILA)

Foz do Iguaçu, 07 de Agosto de 2025.

FORMULARIO DE PRESENTACIÓN DE TRABAJOS ACADÉMICOS

Nombre completo del autor(a): BRYAN JOEL PAREJA RAMIREZ

Curso: INGENIERÍA CIVIL DE INFRAESTRUCTURA

Tipo de Documento	
(...X..) graduación	(.....) articulo
(.....) especialización	(...X..) trabajo de conclusión de curso
(.....) maestria	(.....) monografía
(.....) doctorado	(.....) disertación
	(.....) tesis
	(.....) CD/DVD – obras audiovisuales
	(.....) _____

Título del trabajo de conclusión de curso: ESTABILIZACIÓN DE SUELO EXPANSIVO CON RESIDUOS RECICLADOS DE MORTERO

Nombre del orientador(a): Prof. Dr. Cesar Winter de Mello

Fecha de la Defensa: 07/08/2025

Licencia no exclusiva de distribución

El referido autor(a):

a) Declara que el documento entregado es su trabajo original, y que detiene el derecho de conceder los derechos contenidos en esta licencia. Declara también que la entrega del documento no infringe, tanto como le es posible saber, los derechos de cualquier otra persona o entidad.

b) Si el documento entregado contiene material del cual no detiene los derechos de autor, declara que obtuvo autorización del titular de los derechos de autor para conceder a la UNILA – Universidad Federal de Integración Latinoamericana los derechos requeridos por esta licencia, y que ese material cuyos derechos son de terceros está claramente identificado y reconocido en el texto o contenido del documento entregado.

Si el documento entregado está basado en un trabajo financiado o apoyado por otra institución que no sea la Universidad Federal de Integración Latinoamericana, declara que cumplió con cualquier obligación exigida por el respectivo contrato o acuerdo.

En calidad de titular de los derechos del contenido mencionado, el autor autoriza a la Biblioteca Latinoamericana – BIUNILA a poner la obra a disposición gratuitamente y de acuerdo con la licencia pública *Creative Commons Licença 3.0 Unported*.

Foz do Iguçu, _____ de _____ de _____.

Assinatura do Responsável

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la profesora Mara Rubia Silva, por su apoyo constante y su gran corazón. Fue como un faro que iluminó mi camino cuando la incertidumbre me llevó a dudar, y su voz de la razón nunca se rindió conmigo, incluso en los momentos en que yo había claudicado. Su ejemplo permanecerá como motivo de gratitud eterna.

A mis padres, Segundina Ramírez y Misael Vera, por estar siempre a mi lado, brindándome amor, confianza y respaldo incondicional en cada etapa de mi trayectoria académica y personal.

A Jessica Fontana, por ser una voz de aliento permanente frente a las adversidades, recordándome que la perseverancia y la fe en uno mismo son la base para superar los desafíos.

A Sabrina D. Pereira y Nicole C. Correa, por su confianza depositada en los momentos más inciertos, por su compañía sincera y por la motivación que me transmitieron en las circunstancias más difíciles.

Al profesor Julio Bizarreta Ortega, por su paciencia, constancia y por la amistad que supo construir en este camino, aportando orientación y apoyo invaluable para el desarrollo de este trabajo.

Y a la ingeniera Dalila Netto Sella, por su compañía, sus consejos y su amistad, que fueron un sostén fundamental para mantener el equilibrio personal y académico.

Sé que no consigo expresar en palabras todo el apoyo y la gratitud que siento hacia todas estas personas, por ello, simplemente muchas gracias.

“Theory is the language of experience. Experience must be tested by theory, and theory must be tested by experience.”

“La teoría es el lenguaje de la experiencia. La experiencia debe ser probada por la teoría, y la teoría debe ser probada por la experiencia.”
(Karl Terzaghi)

RESUMEN

El presente estudio investiga la viabilidad técnica y ambiental de emplear residuos reciclados de mortero (RRM) como agente estabilizante de suelos arcillosos expansivos del centro poblado San Antonio, Moquegua, Perú, región que registra históricos daños geotécnicos en infraestructuras por la presencia de montmorillonita cálcica y elevada sismicidad. La investigación contempla la caracterización física, química y mineralógica tanto del suelo nativo como de los RRM mediante ensayos normalizados de granulometría láser, límites de Atterberg, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Posteriormente se formularán mezclas suelo-RRM con dosificaciones de 5 %, 10 % y 15 % en masa, compactadas a humedad óptima, a fin de determinar la variación en densidad seca, índice de vacíos y resistencia mecánica. El desempeño expansivo será evaluado mediante ensayos de expansión libre y presión de hinchamiento. El análisis se extiende a la identificación de los mecanismos de estabilización y la formación de fases cementantes secundarias. La creciente recurrencia de lluvias asociadas al fenómeno de El Niño costero incrementa la humedad disponible en el perfil y agrava los problemas de expansión y pérdida de capacidad portante, por lo que la estabilización propuesta adquiere relevancia estratégica para la resiliencia de la infraestructura local. El estudio busca cuantificar la reducción de la expansión volumétrica y de la presión de hinchamiento, establecer parámetros óptimos de dosificación y proponer directrices para la incorporación de RRM en proyectos de infraestructura, Mitigando los impactos ambientales derivados de la construcción.

Palabras clave: suelos expansivos; residuos reciclados de mortero; estabilización de suelos; montmorillonita cálcica; Moquegua; expansión libre; presión de hinchamiento.

ABSTRACT

The present study investigates the technical and environmental feasibility of using recycled mortar waste (RMW) as a stabilizing agent for expansive clayey soils in the town of San Antonio, Moquegua, Peru—an area with a history of geotechnical damage to infrastructure due to calcium montmorillonite and high seismicity. The research comprises the physical, chemical, and mineralogical characterization of both the native soil and the RMW through standardized tests, including laser granulometry, Atterberg limits, X-ray diffraction, and scanning electron microscopy. Subsequently, soil–RMW mixtures will be prepared with dosages of 5 %, 10 %, and 15 % by mass, compacted at optimum moisture content to determine changes in dry density, void ratio, and mechanical strength. Expansive behavior will be assessed using free-swell and swelling-pressure tests. The analysis extends to identifying stabilization mechanisms and the formation of secondary cementitious phases. The increasing frequency of rainfall associated with the coastal El Niño phenomenon raises the moisture content in the soil profile and exacerbates problems of swelling and loss of bearing capacity, making the proposed stabilization strategy critical for the resilience of local infrastructure. The study aims to quantify the reduction in volumetric expansion and swelling pressure, establish optimal dosage parameters, and propose guidelines for incorporating RMW into infrastructure projects, thereby mitigating the environmental impacts associated with construction.

Keywords: expansive soils; recycled mortar waste; soil stabilization; calcium montmorillonite; Moquegua; free swell; swelling pressure.

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1 – Estructura molecular de láminas sílicas (CUYA, 2018)	17
Figura 2 – Estructura molecular de láminas aluminicas.	17
Figura 3 – Estructura cristalina de los minerales de arcilla esmectita (por ejemplo, montmorilonita), mostrando la unidad TOT básica y el espacio interlaminar.....	18
Figura 4 – Interacción entre iones y agua	20
Figura 5 – Estructuras sedimentarias: (a) orientación "floculada" o "aleatoria"; (b) orientación "dispersa" o "orientada".	21
Figura 6 – Composición de los residuos de construcción y demolición (RCD).....	25
Figura 7 – Tipos de estabilización de suelos expansivos	29
Figura 8 – Etapas de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica	31
Figura 9 – Localización de la formación Moquegua según Decou et al., (2013)	35
Figura 10 – Localización del área recolección de muestras de suelo en el centro poblado de san Antonio, Moquegua	36
Figura 11 – Área de recolección de residuos de mortero (RRM), Avenida Tancredo Neves 336	37
Figura 12 – equipamientos para la trituración y pulverización de RRM	37
Figura 13 – Metodología de estudio.	38
Figura 14 – Tamizes para el ensayo de granulometria por lavado.	39
Figura 15 – equipamiento para granulometria a laser CILAS 1190.	40
Figura 16 – Ensayo de limite liquido por método de Casagrande.	40
Figura 17 – Ensayo de el limite plástico.	41
Figura 18 – Ensayo de masa especifica de los sólidos con bomba de vacío	42
Figura 19 – materiales y compactacion de muestras de suelo y RRM.	42
Figura 20 – Procedimiento para la medicino del pH del suelo.....	43
Figura 21 – Procedimiento de preparación y ensayo de rayos x.....	44
Figura 21 – a) muestra de material, b) equipo de pulverización catódica, c) Microscopio ZEISS EVO 10	45
Figura 22 – dosificacion de suelo - RRM.....	46
Figura 23 – Esquema del Ensayo de Expansión Libre	47
Figura 24 – Adaptación del esquema anterior para fines de ensayo múltiple.	48
Figura 25 – procedimiento de remodelado de material	48
Figura 26 – ensayo de expansión confinada em el oedometro	49
Figura 27 – Grafico de la granulometría del suelo arcilloso.....	50

Figura 28 – Curva granulométrica a laser de los residuos reciclados de mortero (RRM).....	51
Figura 29 – Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS)	52
Figura 30 – curva de densidad seca por humedad del suelo arcilloso	53
Figura 31 - Resultados de pH.....	53
Figura 32 – Picos basales de montmorilonita e cuarzo en una difracción de rayos X (DRX) de un suelo arcilloso.....	56
Figura 33 – Micrografía de una muestra de suelo arcilloso con presencia de montmorilonita.....	56
Figura 34 – Micrografía de residuos reciclados de mortero (RRM) con cristales de portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Hidróxido de calcio)	57
Figura 35 – Micrografía de una muestra de suelo arcilloso estabilizado con residuos reciclados de mortero (RRM)	57
Figura 36 – Dispersión de la expansión libre versus la saturación inicial de la muestras y variación de la saturación (en los círculos)	58
Figura 37 – Izquierda, comportamiento de la expansión libre durante todo el ensayo, derecha, comportamiento de la muestra en los primeros 60 min.	59
Figura 38 – Curvas de expansión libre para diferentes proporciones de RRM	59
Figura 39 – Comparación de las curvas de estabilización para dos materiales mediante el ensayo de expansión libre	60
Figura 40 – reducción de la presión de expansión conforme diferentes dosificaciones y estabilizantes.	61

LISTA DE CUADROS

Tabla 1 – Área superficial específica en m ² /g	19
Tabla 2 – Valores de capacidad de intercambio catiónico para diferentes grupos de minerales arcillosos.....	21
Tabla 3 – Minerales arcillosos y sus respectivos limites	22
Tabla 4 – Potencial de Expansión de Suelos	22
Tabla 5 – Valores típicos de Actividad para arcillas.....	23
Tabla 6 – Criterio de expansión libre conforme seed	23
Tabla 7 – Criterio de presión de expansión conforme Chen 1988	24
Tabla 8 – Características de algunos minerales arcillosos.....	24
Tabla 9 – Comparativo de los porcentajes de material RRM y suelo arcilloso	51
Tabla 10 – Cuadro comparativo de los porcentajes de material RRM y suelo arcilloso	51
Tabla 11 – Gravedad específica media del suelo expansivos.....	52
Tabla 12 – fases identificadas a partir de la difracción de raíz X en las muestras de suelo y RRM.....	54
Tabla 13 – Resultados de la presión de expansión conforme el edómetro	60

SUMARIO

1	INTRODUCCIÓN	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETIVO GENERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS (sea lo mas claro posible en los 3 objetivos)	15
3	REVISIÓN DE LA LITERATURA	16
3.1	SUELOS EXPANSIVOS	16
3.1.1	Estructura De Los Suelos Expansivos	16
3.1.2	Propiedades De Los Suelos Expansivos	18
3.2	MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS	21
3.2.1	Límites de Atterberg	22
3.2.2	Actividad	22
3.2.3	Expansión Libre	23
3.2.4	Presión de Expansión	23
3.2.5	Difracción de rayos X	24
3.3	RESIDUOS RECICLADOS DE MORTERO	25
3.3.1	CLASIFICACIÓN DE LO RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)	25
3.3.2	GENERACIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS DE MORTERO	26
3.3.3	PROCESAMIENTO DEL MORTERO RECICLADO (RRM)	27
3.3.4	CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO RECICLADO	27
3.4	ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS	28
3.4.1	ESTABILIZACIÓN MECÁNICA	29
3.4.2	ESTABILIZACIÓN QUÍMICA	30
3.5	ESTABILIZACIÓN EN SUELOS CON RESIDUOS CEMENTANTES	31
3.5.1	Estabilización en Suelos con Residuos Reciclados de Mortero.	32
3.5.2	Criterios de dosificación	33
4	MATERIALES Y MÉTODOS	34
4.1	OBTENCIÓN DE MATERIALES	34
4.1.1	Localización	34
4.1.2	Geomorfología	34
4.2	OBTENCIÓN DE MATERIALES	35

4.2.1	Suelo Expansivo.....	35
4.2.2	Resíduos Reciclados de Mortero (RRM).....	36
4.3	PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS.....	38
4.3.1	Ensayos Físicos.....	39
4.3.2	Ensayos Químicos y Mineralógicos.....	43
4.3.3	Dosificación de las Mezclas.....	45
4.3.4	Ensayos de Desempeño.....	46
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	50
5.1	CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO Y DEL RRM.....	50
5.1.1	Granulometría del suelo y RRM (NBR 7181/2016).....	50
5.1.2	Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico) (NBR 6459/2016 y NBR 7180/2016).....	51
5.1.3	Gravedad específica del suelo (NBR 6508/2017).....	52
5.1.4	Densidad seca máxima y humedad óptima (NBR 7182:2020).....	52
5.2	CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO Y RRM.....	53
5.2.1	PH del suelo y la mezcla suelo-RRM (ASTM D4972-19).....	53
5.3	CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y MICROESTRUCTURAL.....	54
5.3.1	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	54
5.3.2	Microscopía Electrónica de Barrido (MEB).....	56
5.4	INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE RRM EN LA EXPANSIÓN DEL SUELO.....	58
5.4.1	Expansión Libre del Suelo y la Mistura (ASTM 4546).....	58
5.4.2	Potencial de Expansión del Suelo y la Mistura (ASTM D4546 - Método C).....	60
6	CONCLUSIONES.....	62
7	REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUCCIÓN

Los suelos expansivos constituyen un desafío geotécnico de escala global, debido a las variaciones volumétricas que experimentan frente a cambios en su contenido de humedad. Este comportamiento ocasiona asentamientos diferenciales, agrietamientos y fallas en infraestructuras, generando elevados costos de reparación y mantenimiento (FIROOZI et al., 2017). Aunque técnicas tradicionales como la estabilización con cal, cemento o fibras sintéticas han mostrado eficacia parcial, persisten limitaciones en términos de sostenibilidad y detección temprana del potencial expansivo del suelo.

En el marco de la sostenibilidad y la economía circular, la reutilización de residuos de construcción y demolición (RCD) surge como una alternativa innovadora y ambientalmente responsable. Entre estos materiales, los residuos reciclados de mortero (RRM) destacan por representar alrededor del 38 % del volumen total de RCD y por contener compuestos cementantes residuales, como la portlandita, capaces de inducir reacciones puzolánicas secundarias que mejoran la cohesión y reducen la expansión del suelo (PERINA; TRANNIN, 2019; MORENO PÉREZ, 2018).

La comunidad de San Antonio, en la región de Moquegua (Perú), constituye un escenario crítico para este tipo de problemática. Allí, los suelos presentan alta proporción de montmorillonita cálcica, mineral con elevada capacidad de hinchamiento, lo que compromete la estabilidad de las construcciones. A pesar de encontrarse en una zona árida e hiperárida, la región se ve afectada por lluvias excepcionales asociadas al fenómeno El Niño costero, que incrementan la humedad del perfil del suelo y agravan su potencial expansivo (NAMICELA GUALÁN; BIZARRETA ORTEGA, 2019). Frente a este contexto, se hace necesario explorar métodos de estabilización que no solo resulten técnicamente eficientes, sino también ambientalmente sostenibles.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la influencia de la incorporación progresiva de residuos reciclados de mortero (RRM), en proporciones del 5 %, 10 % y 15 %, sobre la expansión libre y la presión de hinchamiento de los suelos expansivos de Moquegua. La metodología se fundamenta en ensayos normalizados bajo normas ASTM y NBR, lo que garantiza confiabilidad y reproducibilidad. De este modo, la investigación busca proponer una solución técnica y ambientalmente viable, contribuyendo al aprovechamiento de residuos de construcción, al fortalecimiento de la resiliencia de la infraestructura y a la mitigación de los impactos ambientales asociados a la actividad constructiva.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la influencia de la incorporación de residuos reciclados de mortero (RRM) en la estabilización química de suelos expansivos en la ciudad de Moquegua, Perú

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades físicas y químicas de los suelos expansivos procedentes de la ciudad de Moquegua y los residuos reciclados de mortero (RRM) utilizados como estabilizadores.
- Identificar los tipos de minerales expansivos presentes en el suelo, mediante técnicas de difracción de rayos X (DRX).
- Cuantificar la expansión y contracción del suelo no estabilizado durante la saturación, mediante ensayos de hinchamiento libre y expansión confinada
- Evaluar los efectos de la incorporación de diferentes proporciones de residuos reciclados de mortero (RRM) en la estabilidad volumétrica y la susceptibilidad a la expansión higroscópica de suelos arcillosos expansivos

3 REVISIÓN DE LA LITERATURA

3.1 SUELOS EXPANSIVOS

Nelson y Miller (1992) aplican el término de suelo expansivo a cualquier material sea roca o suelo que tenga el potencial de contraerse o expandirse cuando su contenido de humedad varía. Las variaciones de volumen como contracción y expansión se deben a la presencia de minerales arcillosos como la esmectica, este grupo incluye las montmorilonitas, que son altamente expansivas y son los minerales de arcilla más problemáticos (NELSON et al., 2015). Estos minerales presentan una gran absorción de las moléculas de agua, generando un proceso de hinchamiento del material y contracción cuando presenta pérdida de dichas moléculas debido a un proceso de secado (JONES; JEFFERSON, 2012).

Para definirlo mejor, es preciso considerar factores de micro y macroescala, como la mineralogía, estructura del suelo, plasticidad, densidad y contenido de agua, esto permite determinar el comportamiento del suelo expansivo con fines predictivos en la ingeniería (NELSON et al., 2015). Las teorías elástica y plástica clásica no consiguen predecir las deformaciones significativas de los suelos expansivos resultando en la necesidad de desarrollar diferentes enfoques. (JONES; JEFFERSON, 2012).

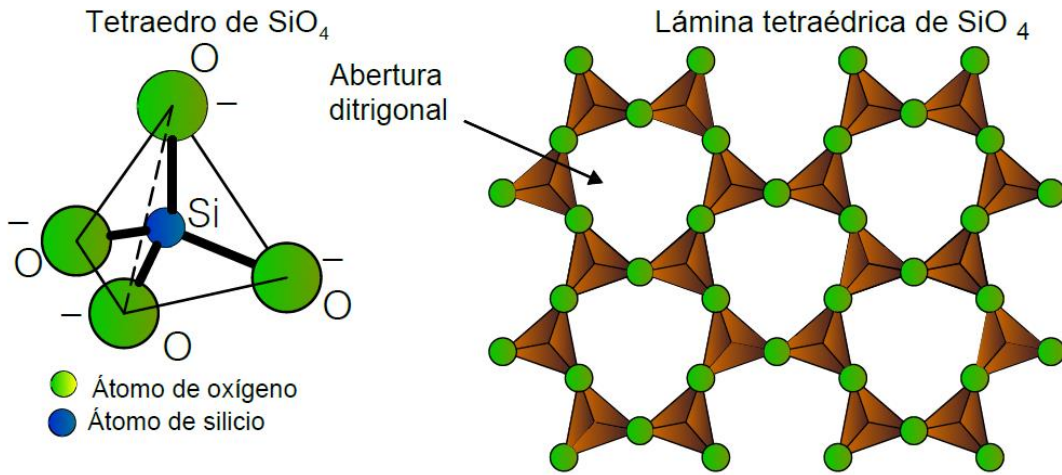
Debido a la capacidad de contracción y expansión de las arcillas en presencia o ausencia del agua, estos pueden representar un riesgo para la construcción, los cambios en el contenido del agua pueden ser ocasionado por factores climáticos como la lluvia y la evaporación o por cambios locales como fugas de agua o desagüe y/o modificaciones en el paisaje, la ausencia prolongada del agua en el suelo con presencia de esmecticas conduce a largo plazo al hundimiento, resultando este un motivo principal de los problemas de expansión que con frecuencia se encuentran en entornos áridos. (JONES; JEFFERSON, 2012).

3.1.1 ESTRUCTURA DE LOS SUELOS EXPANSIVOS

La estructura molecular de una arcilla expansiva (esmectica), está compuesta por dos unidades estructurales simples con una afinidad para la atracción y retención de agua entre capas (JONES; JEFFERSON, 2012). La estructura atómica de la esmectica está compuesta por una lámina de iones coordinados octaédricamente (llamados O), compuesto por anillos hexagonales de aluminio octaédrico ilustrado en la Figura 2, que está dispuesta entre dos capas de iones tetraédricos (llamados T) ilustrado en la Figura 1,

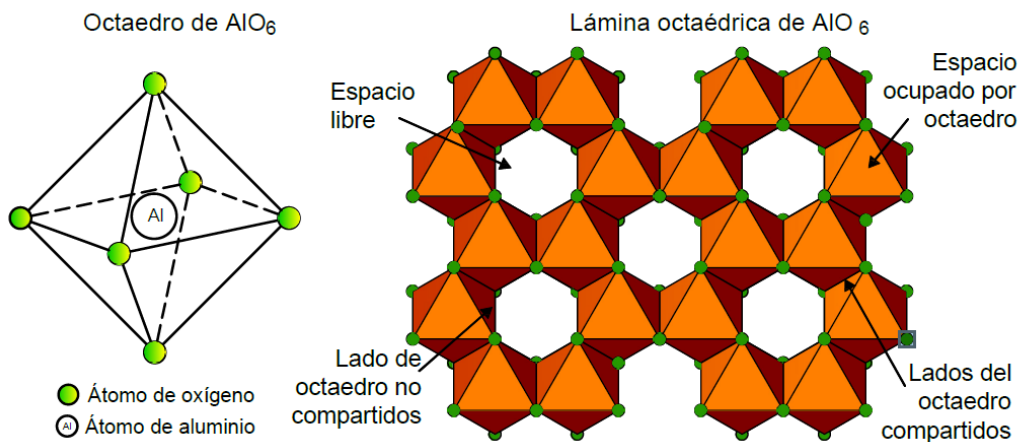
y por anillos de sílice tetraédrica, siendo las unidades (TOT) la estructura básica de las esmécticas (AL-RAWAS; GOOSEN; GUVEN, 2006, 1991).

Figura 1 – Estructura molecular de láminas sílicas



Fuente:(CUYA, 2018).

Figura 2 – Estructura molecular de láminas aluminicas.

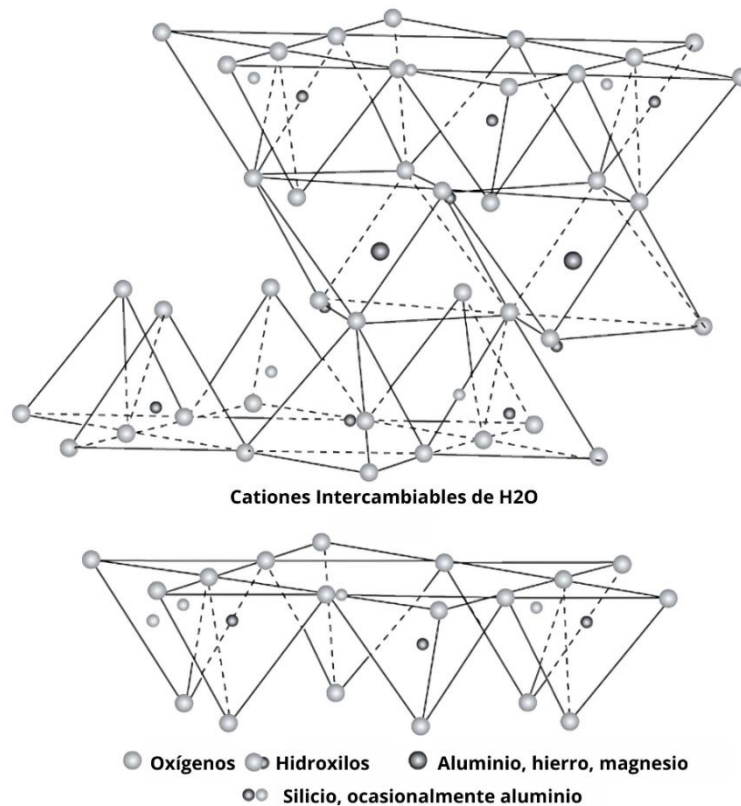


Fuente:(CUYA, 2018).

3.1.1.1 Montmorilonita

La Montmorilonita es originada por una descomposición química de las cenizas volcánicas, presentan una expansión con comportamiento crítico, debido a su formación mineralógica de superposición de dos capas tetraédricas que encierran una capa octaédrica de aluminio expuesta en la Figura 3. La unión entre los bloques (TOT) posee una fuerza de interacción molecular más débil que los puentes de hidrogeno, debido a ello el agua es capaz de penetrar las uniones ocasionando la expansión volumétrica del suelo (NELSON et al., 2015; BOBADILLO, RODRIGUEZ, 2005).

Figura 3 – Estructura cristalina de los minerales de arcilla esmectita (por ejemplo, montmorilonita), mostrando la unidad TOT básica y el espacio interlaminar.



Fuente: (AL-RAWAS; GOOSEN, 2006).

Las esmécticas (Montmorilonita) con composición $[(OH)_4Si_8Al_4O_{20}Nh_2O]$ también presentan cationes dominantes de Ca^{+} (montmorilonita de calcio) e Na^{2+} (montmorilonita de sodio) este último presentado una propiedad mucha más expansiva conforme (HURTADO, 1988). Este material también puede presentar dentro de su composición magnesio (Mg^{2+}) e litio (Li^{+}), refiriéndose de manera genérica y comercial como bentonitas (AL-RAWAS; GOOSEN, 2006). Su extracción también presenta fines comerciales sirviendo para diferentes procesos como: fluidos de perforación, zanjas de lodo, cosméticos, espesantes de pintura y muchos otros (GALAN, 1964).

3.1.2 Propiedades De Los Suelos Expansivos

El comportamiento expansivo de estos suelos se debe a propiedades físicas y químicas específicas, como la plasticidad y el área superficial. La evaluación de estas características facilita la predicción y el manejo de los efectos de hinchamiento y contracción en obras de infraestructura.

3.1.2.1 Área Específica de Superficie

El área específica de superficie incluye la superficie externa y el área de las caras interlaminares, siendo un factor fundamental en la propiedad de hinchamiento y reología del suelo expansivo. En caso de materiales con radio menores de 2nm se utilizan isotermas de carbono las cuales son evaluadas mediante la teoría de llenado de volumen de Dubinin y el área superficial y la distribución de los micro-poros se pueden calcular utilizando las ecuaciones de Dubinin y Medek. El valor del área específica de superficie se utiliza a menudo durante la evaluación preliminar del contenido máximo de esmectita (AL-RAWAS; GOOSEN, 2006).

Tabla 1 – Área superficial específica en m²/g

Mineral de arcilla	Área superficial específica (m²/g)
Caolinita	5 - 55
Illita	80 - 120
Montmorilonita	600 - 800

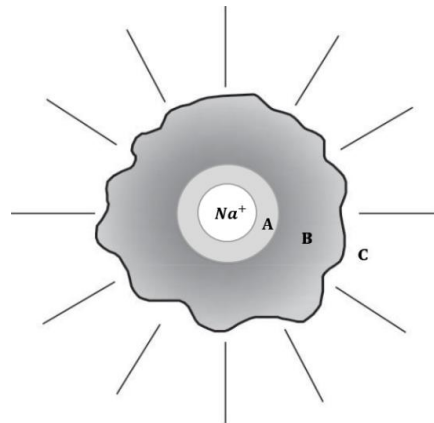
Fuente: (MITCHELL; SOGA, 2005).

La Tabla 1 presenta el área superficial específica de tres minerales arcillosos en unidades de m²/g, según datos reportados por Mitchell y Soga (2005). Los valores muestran diferencias significativas entre estos minerales: la caolinita (5-55 m²/g) e illita (80-120 m²/g) presentan áreas superficiales moderadas, mientras que la montmorilonita (600-800 m²/g) exhibe valores notablemente altos, consistentes con su característica expansiva. Estos datos coinciden con estudios previos sobre arcillas expansivas Al-rawas; Goosen, 2006, lo que confirma que el área superficial específica es un parámetro confiable para identificar y diferenciar minerales arcillosos."

3.1.2.2 Humedad (Hidratación y Absorción)

Los suelos expansivos con presencia de esmécticas son altamente higroscópicos absorbiendo la humedad de manera rápida, para poder entender el concepto de hidratación. Nelson et al. (2015) representó un modelo simple de ion hidratado Figura 4, siendo la región A donde las moléculas son fuertemente retenidas e inmóviles, la región B posee menor estructuración de las moléculas de agua que aún están unidas al ion y la región C donde el agua presenta una pequeña polarización debido al campo iónico, siendo el agua de las regiones A, B y C denominadas agua de hidratación.

Figura 4 – Interacción entre iones y agua



Fuente: (NELSON et. al, 2015).

La deshidratación del material ocurre en varias fases: la primera fase la humedad de los poros escapa provocando la contracción del suelo, la fase posterior con temperaturas superiores a 100°C, se expulsa el agua interlaminar y se produce la desaparición de las propiedades de hinchamiento (AL-RAWAS; GOOSEN, 2006). El agua perdida en la primera fase también lleva la denominación de agua osmótica la cual está presente en la región C, esto genera el acercamiento entre partículas. Debido a esto se considera estos suelos como suelos de expansión contracción (NELSON et al., 2015).

3.1.2.3 Plasticidad

Debido a que suelos expansivos poseen una mayor región polarizada C, tienden a tener una mayor plasticidad y un límite líquido más alto, cuando el contenido de agua es igual al límite líquido, el suelo empieza a desarrollar alguna resistencia al corte, cuando el contenido de agua está por debajo del límite líquido se desarrolla resistencia al corte (NELSON et al., 2015). Los factores microscópicos que afectan la plasticidad son los mismos que controlan el potencial de expansión, presentando de esta manera un indicador útil para la identificación de los suelos expansivos (NELSON; MILLER, 1992).

3.1.2.4 Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La CIC es un indicador que cuantifica la totalidad de cationes necesarios para equilibrar la carga negativa en la superficie de las partículas de arcilla. La CIC se expresa en miliequivalentes por 100 gramos de arcilla seca. La CIC está relacionada con la mineralogía de la arcilla. Un valor alto de CIC indica la presencia de un mineral de arcilla más activo, como el grupo de las esmécticas, mientras que un valor bajo de CIC indica la presencia de un mineral de arcilla no expansivo (MITCHELL; SOGA, 2005). Valores típicos de CIC para los tres minerales arcillosos básicos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2 – Valores de capacidad de intercambio catiónico para diferentes grupos de minerales arcillosos.

Mineral de arcilla	Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) (meq/100g)
Caolinita	1 - 6
Illita	15 - 50
Montmorillonita	80 - 150

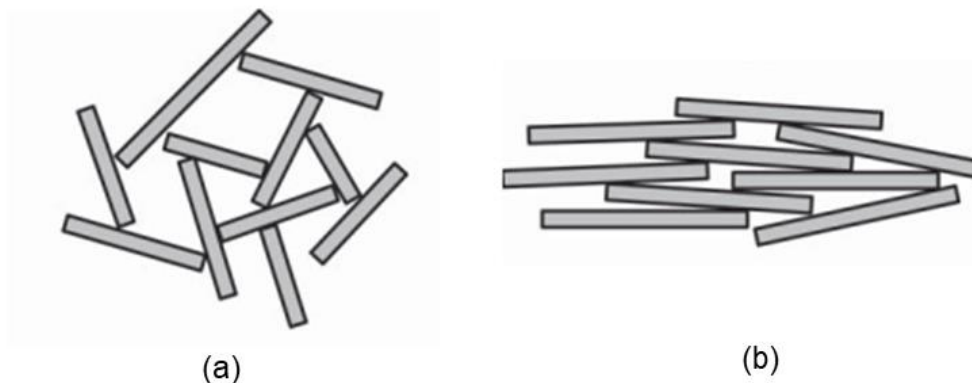
Fuente: Adaptado de (NELSON et al., 2015).

3.1.2.5 Orientación del sedimento de las partículas de arcilla

La orientación y el espaciamiento del suelo tienen influencia en la interacción de las partículas, la Figura 5 muestra la orientación de estructuras completamente floculadas y dispersas, las orientaciones de las partículas en los suelos están en puntos intermedios entre los dos extremos presentados.

El espacio entre partículas en la estructura flocula es mayor siendo las fuerzas de repulsión debido a expansión osmótica menores, en el caso de sobre-consolidación la estructura del suelo es dispersa, por lo que estos poseen una mayor expansión y contracción (NELSON; MILLER, 1992).

Figura 5 – Estructuras sedimentarias: (a) orientación "floculada" o "aleatoria"; (b) orientación "dispersa" o "orientada".



Fuente: (NELSON et. al, 2015).

3.2 MÉTODOS DE IDENTIFICACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS

La identificación de un suelo expansivo es importante durante la investigación preliminar de un sitio, estos pueden ser agrupados por sus propiedades físicas cuanto por sus propiedades mineralógicas y químicas.

3.2.1 Límites de Atterberg

Este define los límites de contenido de humedad de los suelos finos conforme Nelson e Miller (1992) un suelo arcilloso puede existir en cuatro estados diferente dependiendo de su contenido de agua. Definiendo cada límite entre los estados como límite de contracción, límite plástico y líquido.

Tabla 3 – Minerales arcillosos y sus respectivos límites

Tipo de mineral arcilloso	LL	PL	IP
	(%)	(%)	(%)
Caolinita	30 - 100	25 - 40	25 - 29
Illita	60 - 120	35 - 60	15 - 17
Montmorillonita	100 - 900	50 - 100	8.5 - 15

Fuente: Adaptado de (SKEMPTON, 1953).

A partir de los límites de Atterberg pueden ser calculados los índices de plasticidad (IP) y índice de liquidez (LL) siendo estos utilizados para clasificar los suelos expansivos conforme la Tabla 3, y el grado potencial de expansión estimado conforme la Tabla 4.

Tabla 4 – Potencial de Expansión de Suelos

Tipo de mineral arcilloso	LL
	Chen (1983)
Bajo	<30
Medio	30 a 40
Alto	40 a 60
Muy Alto	>60

Fuente: Adaptado de (CHEN, 1983)

3.2.2 Actividad

Es un parámetro derivado al combinar los límites de Atterberg con el contenido porcentual de arcilla, Skempton (1953) define la actividad de la ecuación 1:

$$A = \frac{IP}{\text{fraccion de arcilla}(\%<2\mu m)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Valores típicos para arcillas presentado por (NELSON; MILLER, 1992), este parámetro puede ser utilizado para clasificar la arcilla de forma preliminar, conforme la Tabla 5.

Tabla 5 – Valores típicos de Actividad para arcillas.

Grupo mineral	Actividad
	(PI/% de arcilla)
Caolinita	0.38
Illita	0.9
Montmorillonita (Ca)	1,5
Montmorillonita (Na)	7,2

Fuente: Adaptado de (NELSON e MILLER, 1992).

3.2.3 Expansión Libre

Es un analice importante dentro de la ingeniería para evaluar la variación volumétrica de los suelos en contacto con el agua, Este método fue inicialmente propuesto por Holtz y Gibbs en 1956, Quienes establecieron los criterios de identificación y clasificación de suelos expansivos. Según Nelson et al. (2015), se trata de una metodología sencilla y de fácil aplicación; sin embargo, advierte que los resultados pueden verse significativamente afectados por el grado de trituración de las muestras, en la tabla 6 podemos ver el grado de expansión conforme seed 1962.

Tabla 6 – Criterio de expansión libre

Expansión libre (%) tención 7kPa	Grado de Expansión
>25	Muy Alto
5-25	Alto
1-5	Medio
0-1	Bajo

Fuente: Adaptado de (SEED, 1962).

3.2.4 Presión de Expansión

Definida como la tensión requerida para impedir la hinchazón del suelo (BARBOSA, 2013), refleja propiedades intrínsecas del material y no varía con las condiciones ambientales, correlacionándose directamente con la densidad seca inicial (CASTRO, 1992). Este parámetro puede ser evaluado mediante métodos como el volumen constante Método propuesto por la Asociación Internacional de Mecánica de Rocas, (ISRM, 1989), que aplica una contrapresión inversamente proporcional a la expansión (BORGES, 1981). El proceso implica someter la muestra a presión vertical inicial, inundarla y medir la presión axial necesaria para evitar cambios volumétricos, manteniendo constante su altura, la tabla 7 nos muestra el grado de expansión conforme la presión de hinchamiento en Kpa.

Tabla 7 – Criterio de presión de expansión conforme Chen 1988

Presión de Hinchamiento (Kpa)	Grado de Expansión
> 939,47	Muy Alto
234,38 - 939,47	Alto
141,21 - 234,38	Medio
< 141,21	Bajo

Fuente: Adaptado de (CHEN,1988).

3.2.5 Difracción de rayos X

Mitchel e Soga (2005). definen la DRX como el proceso para la determinación de diferentes minerales basado en las alturas y áreas de pico de difracción, orientaciones de partículas, pesos de la muestra, textura superficial de la muestra, cristalinidad mineral, hidratación y otros factores. El DRX es adecuado para la identificación de minerales de la arcilla porque el espaciamiento de los cristales es del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de los rayos X (NELSON; MILLER, 1992). Los espaciamientos basales se detallan en la Tabla 8, este tipo de análisis muestra mejor precisión cuando la composición del suelo presenta pocos componentes.

Tabla 8 – Características de algunos minerales arcillosos

Grupo mineral	Espaciamiento basal	Características particulares	Enlace entre capas
	(Å)		
Caolinita	14.4	Láminas gruesas y rígidas de seis lados. (0.1 - 4) X (0.05 - 2)µm	enlace fuerte de hidrogeno
Illita	10	Placas delgadas apiladas. (0.003 - 0.1) X (1 - 10)µm	enlace fuerte de potasio
Montmorillonita	9.6	Láminas delgadas y filmosas. (10 Å) X (1 - 10)µm	enlace débil de Van der Waals

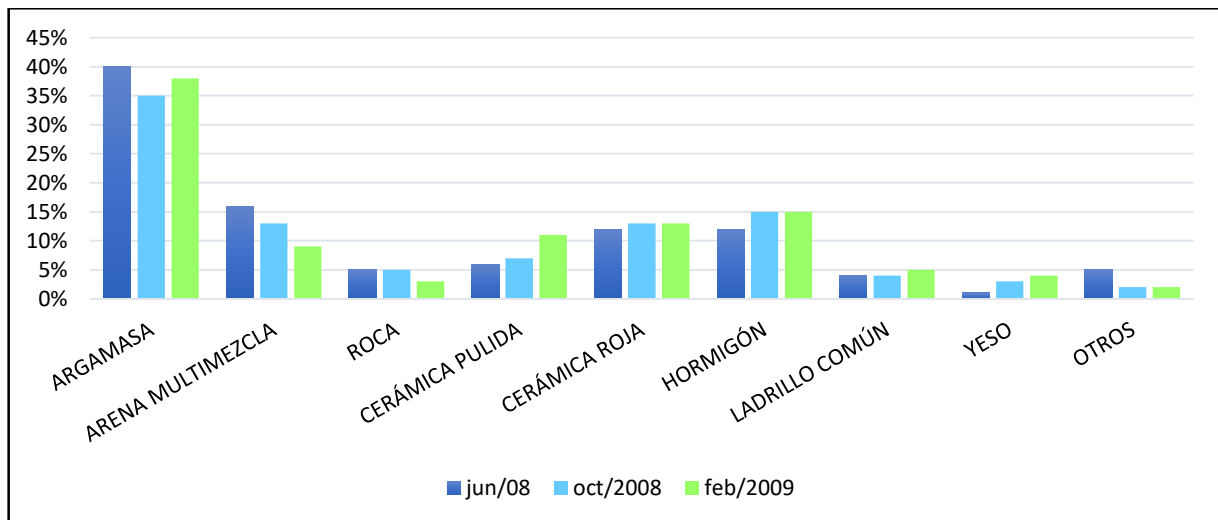
Fuente: Adaptado de (NELSON; MILLER, 1992).

3.3 RESIDUOS RECICLADOS DE MORTERO

Los residuos de construcción y demolición, también conocidos como RCD, son un concepto generalmente relacionado con la industria de la construcción civil, "ya que son todos los materiales que se generan durante la ejecución de una obra civil, los cuales varían en cantidad, volumen y proporción según el tipo de proyecto que se realice (construcción, renovación o ampliación)" (GARAY, 2018). Esta definición se complementa incluyéndolos materiales residuales producto de la demolición.

La composición de los RCD puede presentar variaciones significativas, dependiendo del tipo de obra y de los materiales utilizados en la construcción. Según Oliveira et al. (2011), estos residuos pueden dividirse en nueve subgrupos, Como se observa en la Figura 6, el mortero constituye aproximadamente entre el 37% y el 38% del total de los RCD. Por ello, este estudio se centrará en su potencial para la estabilización de suelos, seguido por el hormigón (14%). De manera similar, Perina y Trannin (2019) afirman que el mortero constituye aproximadamente el 38% de los residuos de construcción, y, junto con el hormigón y los bloques de concreto, conforma el 67% de los RCD.

Figura 6 – Composición de los residuos de construcción y demolición (RCD)



Fuente: Adaptado de (OLIVEIRA. et al 2011).

3.3.1 CLASIFICACIÓN DE LO RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD)

En la actualidad, la ABNT NBR 10004:2024 actualizó los criterios de clasificación de residuos sólidos en Brasil, dividiéndolos en Clase 1 (peligrosos) y Clase 2 (no peligrosos). Bajo esta normativa, los residuos de mortero reciclado (RRM) se encuadran como residuos no peligrosos, inertes o de baja reactividad, lo que refuerza su viabilidad

para el reciclaje y reincorporación en procesos constructivos. Además, la norma establece que, siempre que se compruebe su potencial de reutilización y ausencia de contaminantes, estos materiales pueden ser considerados subproductos, favoreciendo su inserción en cadenas de economía circular y en proyectos de valorización ambientalmente sostenibles.

3.3.2 GENERACIÓN Y GESTIÓN DE RESIDUOS DE MORTERO

De acuerdo con Lozovey y Azevedo (2021) la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) particularmente mortero durante los procesos de producción, transporte y aplicación en obras, se debe a factores como la sobreproducción, el desgaste del material, una aplicación ineficiente, transporte inadecuado y pérdidas integradas en el proceso constructivo.

El mortero reciclado se obtiene mediante la trituración y procesamiento de estos residuos. Sus propiedades físicas, químicas y mecánicas están directamente influenciadas por la presencia de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), las técnicas de reciclaje empleadas y la presencia de impurezas en el material recuperado. En el cuadro 2 se presentan las principales causas de generación de residuos de mortero en obras, así como posibles soluciones para minimizar su producción.

Cuadro 1 – Causas y soluciones para la reducción de residuos de mortero.

Consecuencia/Efecto	Soluciones propuestas
Desperdicio de materia prima	Implementación de un proyecto de organización del patio de obra
Falta de planificación funcional para el almacenamiento de materiales	Desarrollo de estrategias para una gestión eficiente del almacenamiento
Falta de estandarización en la ejecución de tareas	Capacitación y formación técnica para operarios
Falta de organización en el depósito de residuos, generando mezcla de materiales de diferentes clases	Implementación de un sistema de separación y clasificación para el reciclaje

Fuente: Adaptado de Lozovey y Azevedo (2021).

3.3.3 PROCESAMIENTO DEL MORTERO RECICLADO (RRM)

El procesamiento de los residuos de construcción y demolición (RCD) para la producción de agregados es un procedimiento relativamente simple, que implica la separación de materiales, eliminando aquellos que puedan comprometer la calidad del producto final. Posteriormente, los materiales seleccionados son triturados y clasificados de acuerdo con la normativa vigente sobre clasificación dimensional de agregados (BARROS, 2013).

La reutilización de los residuos de mortero requiere un procedimiento bien estructurado que incluya clasificación, separación y trituración del material (LEITE et al., 2011). Estos procesos son fundamentales para garantizar la calidad del material reciclado y optimizar su desempeño en aplicaciones específicas, como la estabilización de suelos. Además, una gestión adecuada de estos residuos contribuye significativamente a minimizar su impacto ambiental.

Según Poon et al. (2009), a partir de los residuos de construcción civil pueden generarse dos tipos principales de materiales reciclados: los agregados reciclados de hormigón, que provienen del triturado del hormigón reciclado, y los agregados mixtos, que incluyen otros componentes como el mortero. Por su parte, Melbouci (2009) destaca las ventajas de utilizar agregados reciclados, debido a su comportamiento no expansivo, atribuido a la presencia de componentes cementantes en su composición, lo que refuerza su potencial para aplicaciones en diversas áreas de la construcción.

En este trabajo, se enfatiza el uso de residuos clasificados como Clase A, enfocándose específicamente en el mortero reciclado en su fracción fina (en forma de polvo). Este material presenta un gran potencial como estabilizador químico para suelos expansivos, debido a la presencia de cemento residual, cuyas propiedades pueden mejorar la cohesión del suelo y reducir su hinchamiento. Estas características lo convierten en una alternativa viable para aplicaciones en la ingeniería geotécnica.

3.3.4 CARACTERIZACIÓN DEL MORTERO RECICLADO

La elevada absorción de agua de los agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD) se debe principalmente a la presencia de materiales porosos, como el mortero y la cerámica. Esta característica influye en propiedades físicas clave, aspecto que debe considerarse en su reutilización (LEITE et al., 2011). Según el CEDEX (2011), la absorción de agua en los materiales finos reciclados de

tamaño inferior a 10 mm puede afectar la densidad máxima y otras propiedades, como la trabajabilidad, lo cual impacta directamente en su desempeño en aplicaciones constructivas.

La caracterización de los RCD implica la identificación, separación y clasificación de los distintos materiales en función de sus características físicas y su origen. Este proceso es esencial para determinar parámetros como volumen, peso y proporciones de los residuos de construcción, permitiendo establecer estrategias adecuadas de gestión.

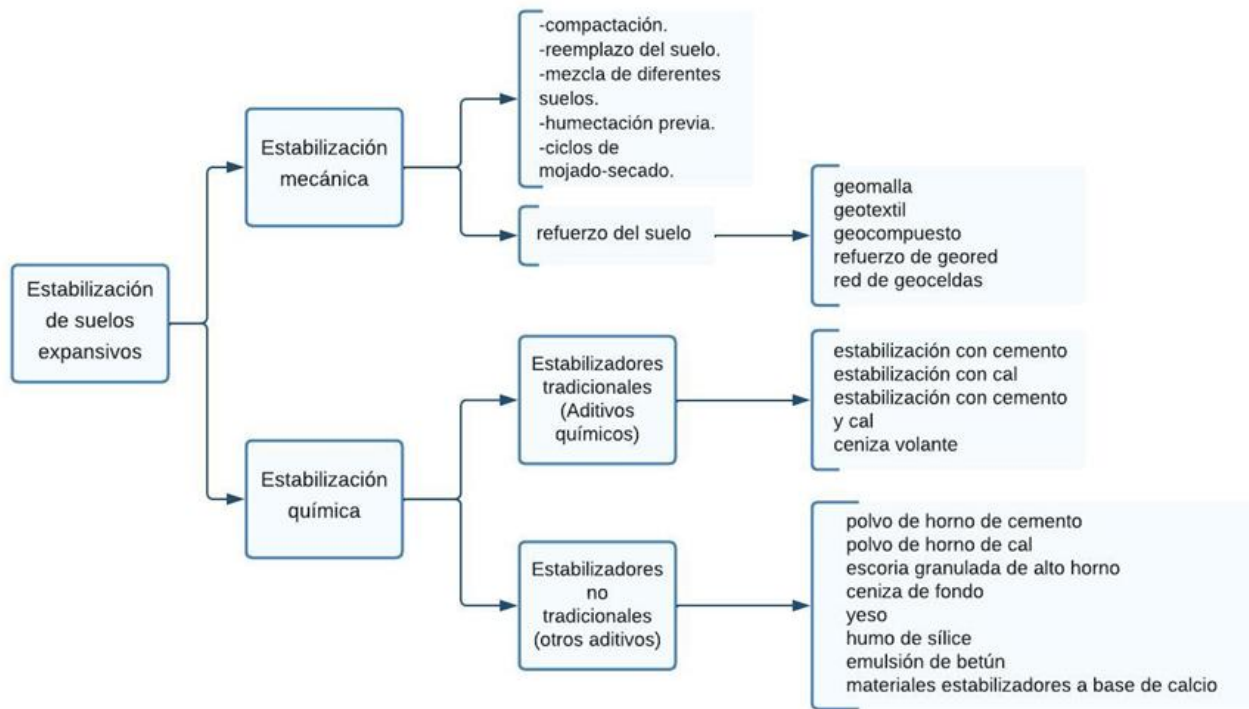
Una planificación eficiente en la gestión de residuos permite identificar los materiales con potencial de reutilización, reciclaje o disposición final adecuada. Sin embargo, es importante destacar que la caracterización de los RCD puede variar según las normativas y regulaciones locales, así como las prácticas adoptadas en cada país o región. Por lo tanto, la caracterización requiere una metodología estructurada para la recopilación de información y muestras, con el fin de determinar la composición de los residuos y sus propiedades

3.4 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS EXPANSIVOS

La estabilización de suelos es una técnica aplicada para mejorar propiedades específicas deseadas del material, resulta esencial en arcillas expansivas que, al absorber agua, sufren bruscas variaciones volumétricas capaces de generar grietas, fisuras y asentamientos diferenciales en aceras, carreteras y edificaciones. dado esto se recurre a técnicas de estabilización química o mecánica que modifican de forma duradera el comportamiento del suelo, aumentando la seguridad y la vida útil de las obras (CONSTANTINO, 2018).

Fondjo, Theron y Ray (2021) recopila todos los métodos utilizados para la estabilización de suelos expansivos conforme la Figura 7. Esta imagen nos permite analizar una gran variedad de posibles soluciones para la problemática de suelos expansivos. La elección del método debe tener en cuenta factores climáticos, económicos, características del suelo y objetivo de la construcción a realizar. Con el objetivo reducir la sensibilidad al contacto con la humedad, disminuir la deformabilidad y la permeabilidad conforme cada caso particular lo solicite.

Figura 7 – Tipos de estabilización de suelos expansivos



Fuente: Adaptado de (FONDJO; THERON; RAY, 2021).

La estabilización de suelos expansivos se divide en dos grandes grupos: estabilización mecánica, cuando se producen cambios de orden físico en el suelo, y estabilización química, cuando las modificaciones resultan de la interacción química entre las partículas del suelo y un agente estabilizante (GONDIM, 2008).

3.4.1 ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

Los métodos mecánicos se han utilizado ampliamente en la práctica de ingeniería para el tratamiento de suelos expansivos, teniendo por objetivo la reducción del potencial de expansión y la presión de expansión sin modificar la química del suelo (FONDJO; THERON; RAY, 2021). Los procedimientos de estabilización mecánica, como la compactación y la corrección granulométrica, son utilizados para cambiar la disposición de las partículas del suelo o su distribución de tamaños (GONDIM, 2008).

La compactación del suelo es un proceso utilizado en ingeniería para cumplir con diversos objetivos fundamentales, como reducir el asentamiento del suelo bajo cargas vivas, prevenir problemas de licuefacción, mejorar la resistencia al corte, la capacidad de carga del suelo y aumentar el factor de seguridad contra posibles fallas reduciendo las características de expansión y contracción del suelo" (ATTOM, 1997 apud BATISTA, 2021). La compactación se logra mediante la aplicación de fuerzas externas,

como rodillos o compactadores manuales, que comprimen las partículas del suelo, reduciendo los espacios vacíos y aumentando la densidad del material.

La selección del método de compactación y el control de los parámetros de compactación, son aspectos clave para obtener resultados óptimos en términos de capacidad portante, durabilidad y rendimiento del suelo compactado. La ventaja de este procedimiento es debido a que no requiere experimentos de laboratorio estandarizados que consuman mucho tiempo, también debido a que el procedimiento de aplicación es relativamente simple y no requiere personal altamente capacitado para implementarlo. (FONDJO; THERON; RAY, 2021).

La estabilización granulométrica implica mezclar proporcionalmente uno o más suelos con el suelo original y compactar esta mezcla para lograr un material más compacto y con menor deformación (PEREIRA, 2012). Este proceso se puede llevar a cabo en el lugar de trabajo o en diferentes ubicaciones antes de entregar la mezcla al sitio de trabajo, donde se extiende y compacta hasta alcanzar una densidad adecuada. El resultado es un producto final con menor compresibilidad y mayor estabilidad.

La estabilización mecánica del suelo presenta ventajas: impacta de manera positiva el cronograma de obras frente a retrasos relacionados a temporadas de lluvia permitiendo una continuidad de la obra, y no representa el peligro de tener un impacto ambiental adverso por la liberación de compuestos potencialmente nocivos; la aplicación puede ser rápida cuando las características de ingeniería de los suelos expansivos no se consideran críticas (FONDJO; THERON; RAY, 2021).

3.4.2 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

La estabilización química es un proceso en el cual se agregan agentes estabilizadores al suelo con el objetivo de modificar sus propiedades mecánicas e hidráulicas. Entre estos agentes estabilizadores se incluyen cemento, cal, cenizas volantes, productos bituminosos y polímeros, entre otros (GONDIM, 2008). Al añadir estos agentes al suelo, se produce una reacción química que aglutina las partículas del suelo. Esta aglutinación de partículas reduce la expansión del suelo.

La estabilización química es ampliamente utilizada en el tratamiento de suelos expansivos. El objetivo principal es mejorar la estabilidad del suelo aumentando el tamaño de sus partículas, reduciendo su índice de plasticidad y controlando su potencial de expansión y contracción, la mezcla de suelo cemento puede incrementar la capacidad

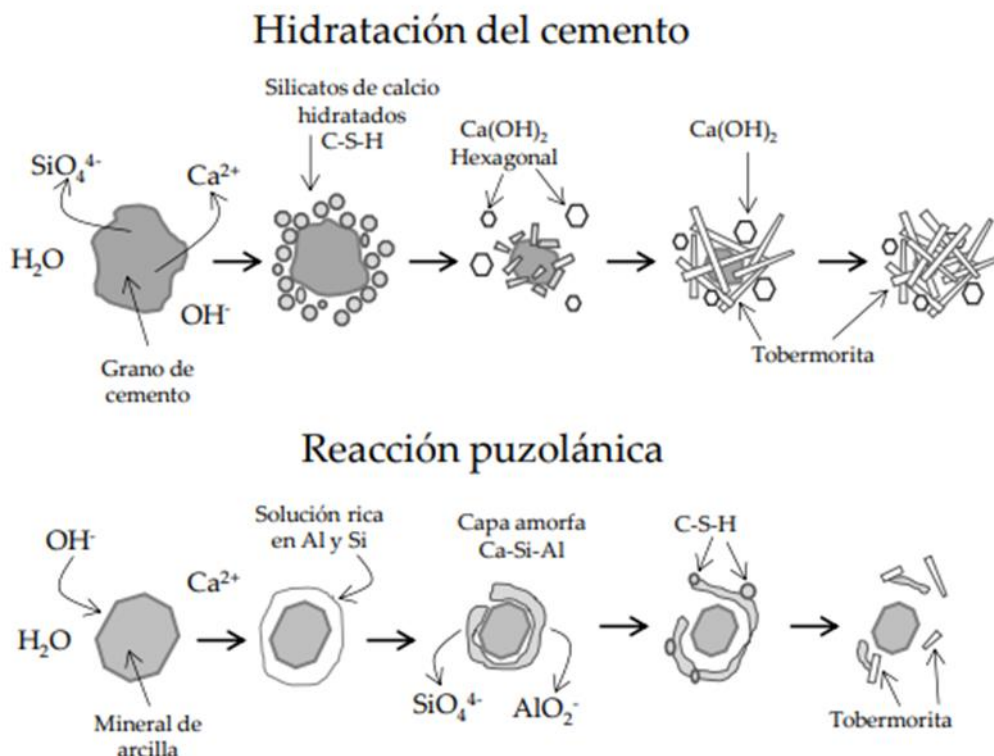
portante del suelo (NELSON et al., 2015).

3.5 ESTABILIZACIÓN EN SUELOS CON RESIDUOS CEMENTANTES

La estabilización química con cemento Portland es ampliamente empleada en suelos arcillosos debido a su eficacia. Al mezclar suelo, agua y cemento, se forma un material denominado suelo-cemento, que, tras compactación, genera una masa cohesionada con mayor resistencia y menor expansión (TOIRAC, 2008). Los factores clave que influyen en la estabilidad son la proporción de cemento, el tiempo de curado y la densidad de compactación.

La estabilización química de suelos con cemento se basa en la reacción de hidratación del clinker, donde los compuestos del cemento reaccionan con agua para formar productos como la tobermorita (C-S-H) y la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), tal como se observa en la Figura 8. Estos productos actúan como agentes cementantes, rellenando los poros del suelo, incrementando su cohesión y reduciendo su plasticidad y expansión.

Figura 8 – Etapas de la hidratación del cemento y de la reacción puzolánica



Fuente: MORENO PÉREZ, 2018

"El cemento es un material ampliamente utilizado para la estabilización de casi todo tipo de suelo, especialmente suelos de granulometría fina como los arcillosos" (MEDINA; INGLES; METCALF; 1987, 1972 apud GONDIM, 2008). La adición de cemento al suelo incrementa la resistencia, capacidad de soporte y reduce la permeabilidad, aunque en suelos expansivos, altas proporciones de cemento pueden ocasionar grietas por retracción. Los materiales cementantes presentes en los residuos reciclados contribuyen de igual manera a la formación de enlaces químicos y mejoran la cohesión del suelo. Este tratamiento también tiene otros efectos beneficiosos, como la reducción de la plasticidad y contracción y el incremento del módulo elástico (FONDJO; THERON; RAY, 2021).

3.5.1 Estabilización en Suelos con Residuos Reciclados de Mortero.

La incorporación de residuos de mortero reciclado (RRM) en suelos arcillosos ha surgido como una solución innovadora, al representar 37 % de los residuos reciclados, Según AGUILAR (2023 añadir entre un 5% y un 15% de RRM al suelo mejora su cohesión y disminuye la expansión de las arcillas. Esto ocurre porque el mortero reciclado contiene partículas de cemento residual, De acuerdo con Moreno Pérez (2018), el material cimenticio reciclado contiene una cantidad residual de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), lo que favorece la estabilización del suelo arcilloso. Este proceso contribuye, además, a reducir los costos de estabilización mediante la reutilización de compuestos cementantes presentes en el Mortero reciclado.

Desde un enfoque sostenible, el uso de RRM no solo resuelve problemas técnicos, sino que también fomenta la economía circular. Un estudio de la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (México) demostró que los suelos tratados con mortero reciclado presentan menor permeabilidad y mayor densidad, lo que los hace ideales para bases de caminos o rellenos en construcción (UAEH, 2020). Esto reduce el volumen de residuos en vertederos, generando beneficios positivos para el medio ambiente.

Como se muestra en la Figura 8, la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) del RRM reacciona con los silicatos y aluminosilicatos del suelo arcilloso mediante una reacción puzolánica. Este proceso genera compuestos cementantes, principalmente silicatos de calcio hidratado, que mejoran la cohesión del suelo, reducen su permeabilidad y limitan su expansión, de forma similar a la hidratación del cemento.

3.5.2 Criterios de dosificación

La norma NBR 12.253/1992, relativa a la dosificación de suelo-cemento para su uso en capas de pavimento, establece que el contenido de cemento debe oscilar entre el 5 % y el 10 % del peso total de la muestra de suelo. Esta norma establece las medidas de dosificación de las mezclas de suelo-cemento para esta limitación de muestras pequeñas. Los pasos incluyen: elegir el contenido de cemento, moldear y curar la probeta, realizar un ensayo de compresión simple con el objetivo de identificar la resistencia a la compresión simple y determinar el contenido de cemento. Esta norma recomienda realizar el ensayo de compactación según la NBR 12023.

Según la norma NBR 12023/1992, sobre Suelo-Cemento - Ensayo de compactación, se recomienda utilizar tres capas de suelo dentro del cilindro (probeta) con 26 golpes, con el fin de obtener un gráfico con el contenido óptimo de humedad y masa específica. Este ensayo es similar al ensayo de Proctor, donde se obtiene como resultado una curva con la humedad y densidad seca del suelo.

4 MATERIALES Y MÉTODOS.

La presente investigación se enmarca dentro de un enfoque cuantitativo, de naturaleza experimental y aplicada, con el objetivo de evaluar el efecto del uso de residuos reciclados de mortero triturado pulverizado (RRM) en la estabilización de suelos expansivos.

El estudio se desarrollará en laboratorio, siguiendo un diseño experimental con distintas proporciones de RRM y cemento Portland, a fin de analizar su influencia en la mejora de las propiedades físico-mecánicas del suelo. La caracterización del suelo y de los materiales reciclados se realizará conforme a normativas nacionales e internacionales.

El análisis de resultados se llevará a cabo mediante herramientas de estadística descriptiva e inferencial, comparando los valores obtenidos con criterios normativos. La metodología aplicada permitirá la replicación del estudio, validación de los resultados y la identificación de posibles limitaciones en la aplicación de RRM como material estabilizante.

4.1 OBTENCIÓN DE MATERIALES

4.1.1 Localización

San Antonio de Moquegua es un pueblo ubicado en la región de Moquegua, en el sur de Perú, caracterizado por montañas circundantes y valles profundos. La ciudad se encuentra a una altitud de aproximadamente 1400 metros sobre el nivel del mar y se puede acceder a ella a través de una carretera pavimentada. La región presenta riesgos geotécnicos, que incluyen movimientos tectónicos y terremotos, que deben ser considerados cuidadosamente en la planificación de proyectos de construcción. Además, la región cuenta con suelos de diferentes características geotécnicas, lo que requiere un análisis cuidadoso para el diseño de cimientos y estructuras.

4.1.2 Geomorfología

La Formación Moquegua constituye una depresión sedimentaria alargada que se prolonga desde el extremo sur del Perú hasta el norte de Chile conforme figura 9, con sedimentos depositados entre el Paleoceno tardío (≈ 50 Ma) y el Plioceno (≈ 4 Ma) conforme Decou et al., (2013). En los alrededores del centro poblado de San Antonio de Moquegua predominan arcillitas y limolitas finas, salpicadas por bancos arenosos y lentes de grava, herencia de etapas lacustres; esta mezcla explica el acusado potencial expansivo

de los suelos locales.

Figura 9 – Localización de la formación Moquegua según Decou et al., (2013)



Fuente: Namicela Gualán y Bizarreta Ortega (2019)

El relieve actual, marcado por valles encajados y abanicos aluviales, refleja la combinación de levantamientos tectónicos andinos y procesos de erosión fluvial. Aunque la zona mantiene un clima árido-hiperárido, los episodios de lluvia intensa asociados a El Niño desencadenan flujos de lodo y remociones en masa sobre taludes poco consolidados, renovando la dinámica geomorfológica (NAMICELA GUALÁN; BIZARRETA ORTEGA, 2019). Estas condiciones, sumadas a la sismicidad regional, argumentan la necesidad de mayor comprensión de los fenómenos expansivos de los suelos arcillosos y la necesidad de la estabilización de los mismos.

4.2 OBTENCIÓN DE MATERIALES

4.2.1 Suelo Expansivo

La Figura 11 muestra la ubicación del área de muestreo de suelo en el centro poblado de San Antonio, Moquegua. Conforme al estudio de Allca Quispe (2022), la muestra corresponde a un suelo deformado, extraído a una profundidad media de 1 m, en las proximidades de la intersección entre la Av. San Antonio Sur y la Av. Mariano Lino Urquieta, aproximadamente a 100 m de dicha intersección.

Figura 10 – Localización del área recolección de muestras de suelo en el centro poblado de san Antonio, Moquegua.



Fuente: ALLCA QUISPE, 2022

Debido a la alta dureza del material, fue necesario el uso de herramientas como la barreta para facilitar su fragmentación. Antes del transporte, el suelo recolectado fue debidamente empaquetado para preservar sus características y evitar alteraciones en su composición (ALLCA QUISPE, 2022). Para optimizar el traslado desde el sitio de excavación hasta el laboratorio de suelos de la universidad, se recolectó una muestra deformada de aproximadamente 5 kg.

El material fue transportado hasta el laboratorio de suelos en la UNILA, donde se llevó a cabo su preparación conforme a la norma ABNT NBR 6457:2016. La fragmentación del material grueso se realizó de manera manual, utilizando herramientas adecuadas para evitar alteraciones en su granulometría natural. Posteriormente, la muestra fue homogeneizada, garantizando su correcta adecuación para los ensayos de caracterización.

4.2.2 Resíduos Reciclados de Mortero (RRM)

Los materiales utilizados en este estudio incluyen residuos reciclados de mortero (RRM) provenientes de una obra demolida ubicada en la Avenida Tancredo Neves 336, en Foz do Iguaçu, local identificado en la figura 11. El material fue inicialmente recolectado en el sitio y sometido a un proceso de separación manual para eliminar impurezas y partículas no deseadas. Después de esta etapa, los residuos fueron transportados al laboratorio de suelos de la UNILA, donde se llevó a cabo un proceso de trituración y pulverización para obtener un material con la granulometría adecuada para los ensayos.

Figura 11 – Área de recolección de residuos de mortero (RRM), Avenida Tancredo Neves

336



Fonte: google earth (2024).

En la figura 12 se observa los equipamientos para la preparación del RRM, se utilizó un triturador de mandíbulas de laboratorio modelo Contenco I-4198, encargado de la primera etapa de fragmentación del material. Posteriormente, el material triturado fue sometido a un proceso de molienda fina en un molino de barras tipo Sonnex 47 L (SL-29/47), operando durante una hora con una proporción de 5 kg de barras por cada kilo de residuo de mortero. Este procedimiento garantizó la obtención de partículas con la granulometría adecuada para su aplicación en la estabilización del suelo expansivo.

Figura 12 – equipamientos para la trituración y pulverización de RRM .

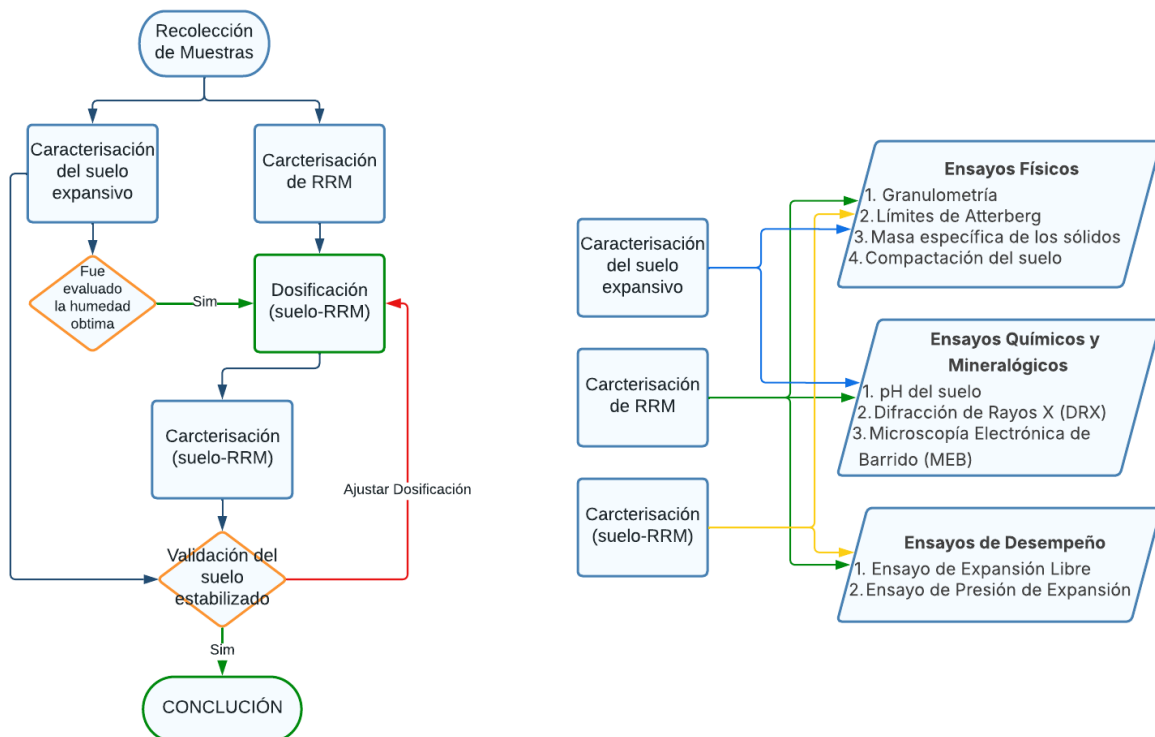


Fuente: Autor (2024).

4.3 PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS

El procedimiento metodológico seguido en este estudio se representa en el flujo de trabajo conforme la figura 13, donde se inicia con la recolección de muestras de suelo expansivo y residuos reciclados de mortero (RRM). las cuales son sometidas a una caracterización física y mecánica mediante ensayos como granulometría, límites de Atterberg, masa específica de los sólidos y compactación, tanto para el suelo como para el RRM. Con base en estos resultados, se define la dosificación de la mezcla (suelo + RRM), evaluando su humedad óptima y ajustando las proporciones si es necesario. La mezcla resultante es analizada mediante ensayos físicos (compactación), químicos (pH), mineralógicos (difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido) y de desempeño (expansión libre y presión de expansión). Los datos obtenidos son interpretados y comparados con criterios preestablecidos; si no cumplen los requisitos, se retroalimenta el proceso, modificando la dosificación y repitiendo la caracterización. Una vez validada la estabilidad y reducción de expansión del suelo tratado, se concluye el estudio, demostrando la eficacia del RRM como material sostenible para la estabilización de suelos problemáticos.

Figura 13 – Metodología de estudio.



Fonte: Autor (2024).

4.3.1 Ensayos Físicos

- **Granulometría** – NBR 7181/2016.

El ensayo de granulometría se realizó conforme a la norma NBR 7181/2016. Para ello, el material previamente seleccionado mediante cuarteo fue secado y tamizado a través del tamiz No. 10 (2 mm). A partir de este material, se separó una muestra de 120 g, la cual fue sometida a lavado sobre el tamiz No. 200 (0.075 mm). Posteriormente, el material retenido en el tamiz fue secado y sometido a agitación mecánica en una columna de tamices para determinar la distribución del material retenido acumulado, lo que permitió la elaboración de la curva granulométrica.

Figura 14 – Tamices para el ensayo de granulometria por lavado.



Fuente: Autor (2024).

Para la granulometría por difracción láser figura 15, se seleccionaron las fracciones finas que pasaron por el tamiz No. 200 (diámetro < 0,075 mm) obtenidas del tamizaje. La muestra fue dispersada en una solución con adición de hexametáfosfato de sodio y se dejó en inmersión durante 24 horas antes del ensayo. Se utilizó un granulómetro a láser CILAS 1190 para determinar la distribución de partículas en el rango de 0,1 a 1000 μm . Finalmente, se registraron los valores de diámetro equivalente y se generó la curva granulométrica correspondiente.

Figura 15 – equipamento para granulometria a laser CILAS 1190.



Fuente: Autor (2024).

- **Límites de Atterberg (liquidez y plasticidad)** – NBR 6459/2016 y NBR 7180/2016.

El límite líquido y el límite plástico, incluidos en los límites de Atterberg, fueron estimados siguiendo los procedimientos de la norma NBR 6459/2016. Para la determinación del límite líquido (LL), se utilizó el método de Casagrande figura 16, en el cual una manivela gira a una velocidad de dos golpes por segundo hasta lograr el cierre de un surco de 13 mm de longitud (con una base de 2 mm de ancho). Se registró el número de golpes necesarios en función de la humedad del material. Este procedimiento se repitió para diferentes contenidos de humedad, y los resultados fueron representados en una gráfica de w vs. $\log(N)$, obteniendo el LL como la humedad correspondiente a $N = 25$.

Figura 16 – Ensayo de limite liquido por método de Casagrande.



Fuente: Autor (2024).

El límite plástico (LP) figura 17 se determinó conforme a la norma NBR 7180/2016, utilizando una muestra de 20 g de material. Luego de ser humedecido, el suelo adquirió buena maleabilidad, permitiendo moldearlo en forma de un rollo cilíndrico de 3 mm de diámetro. El criterio de medición fue la ruptura, agrietamiento o fragmentación del rollo al alcanzar dicho diámetro. El ensayo se realizó en tres pruebas para verificar la repetibilidad de los valores, calculando la humedad en el momento del agrietamiento como el límite plástico del material.

Figura 17 – Ensayo del límite plástico.



Fuente: Autor (2024).

- **Masa específica de los sólidos** – NBR 6508/2017 ou NBR 16635:2017

Para este ensayo, se utilizaron 20 g de suelo previamente seco, siguiendo el procedimiento establecido en la NBR 6508/2017. Conforme figura 18 Se prestó especial atención a la eliminación de burbujas de aire, utilizando agua destilada y una bomba de vacío para mejorar la dispersión de las partículas. Este procedimiento generó una variación en la temperatura del agua, por lo que fue necesario aplicar la corrección a 20°C conforme a la fórmula (X) establecida en la NBR 6508/2017.

$$\rho_s = \frac{P2 - P1}{(P4 - P1) - (P3 - P2)}$$

$P1$ = Peso del picnómetro vacío (g)

$P2$ = Peso del picnómetro con la muestra seca (g)

$P3$ = Peso del picnómetro con la muestra y agua (g)

$P4$ = Peso del picnómetro lleno solo con agua (g)

ρ_s = Densidad de las partículas sólidas o masa específica de los sólidos o densidad real del suelo.

$$\rho_s = \frac{P2 - P1}{(P4 - P1) - (P3 - P2)} * \frac{\rho_{agua\ 20^\circ\ C}}{\rho_{agua}}$$

Figura 18 – Ensayo de masa específica de los sólidos con bomba de vacío

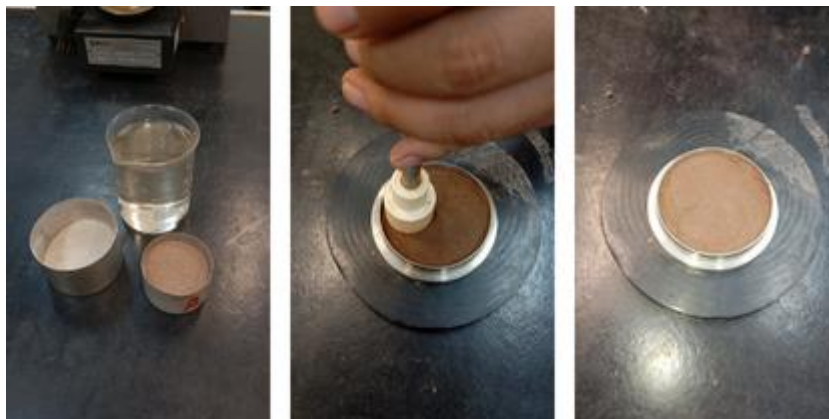


Fuente: Autor (2024).

- **Compactación del suelo** – NBR 12023/1992.

El ensayo de compactación figura 19 se realizó mediante una adaptación de la norma NBR 7182:2020, ajustando las dimensiones. Para ello, el material se secó previamente en horno a 105°C (según NBR 6457:2016), se homogenizó asegurando la compatibilidad con el tamaño reducido de los moldes. Se emplearon anillos de compactación de 50.55 mm de diámetro por 20.02 mm de altura, y se mantuvieron constantes los parámetros: martillo de 2.5 kg, altura de caída de 305 mm y 25 golpes por capa en tres capas sucesivas.

Figura 19 – materiales y compactación de muestras de suelo y RRM.



Fuente: Autor (2024).

Para cada punto de humedad evaluado, se preparó una submuestra de 200 g humedeciéndola con agua destilada hasta lograr una distribución homogénea y se extrajo una porción para cuantificar el contenido de humedad (NBR 6457:2016). Tras la compactación, se determinó la masa húmeda del suelo en el molde, La densidad seca (ρ_s) se calculó mediante la ecuación:

$$\rho_s = \frac{\text{massa humeda}}{\text{volumen} * (1 + \frac{w}{100})}$$

w =Contenido de humedad

Donde w es el contenido de humedad (%). Con los datos obtenidos, se construyó la curva ρ_s vs. w y se identificaron la densidad seca máxima ($\rho_{s,max}$) y la humedad óptima (w_{opt}), esta adaptación fue necesaria debido a la limitada cantidad de muestras y la granulometría fina del material.

4.3.2 Ensayos Químicos y Mineralógicos

- **pH del suelo** – ASTM 4972-19.

La prueba de pH figura 20 se llevó a cabo siguiendo la normativa ASTM D4972-19 (Standard Test Method for pH of Soils). Se utilizó una muestra de 10 gramos de suelo, previamente secado al aire y tamizado por el tamiz N°10 (abertura de 2 mm), tal como se muestra en las Fotografías 2a y 2b. Con una probeta graduada, se agregaron 20 ml de agua destilada desionizada al suelo, y la mezcla se homogeneizó en un vaso de precipitado de vidrio mediante agitación manual durante 1 minuto. La suspensión se dejó en reposo durante 24 horas en condiciones ambientales (Fotografía 2c). Finalizado el tiempo de reposo, se midió el pH utilizando un medidor electrónico, sumergiendo el electrodo directamente en la mezcla y registrando el valor estabilizado después de 60 segundos.

Figura 20 – Procedimiento para la medición del pH del suelo.



Fuente: Autor, 2024

- **Difracción de Rayos X (DRX)** – Determinación de fases cristalinas.

El análisis se realizó utilizando el difractómetro Panalytical Empyrean. Para la preparación de la muestra, las muestras de suelo fueron pulverizadas en un mortero y posteriormente tamizadas con el tamiz N°200 (75 μm) para obtener una fracción fina adecuada para el análisis. El material pasante se colocó en un porta muestras, asegurando una distribución uniforme. El análisis se llevó a cabo en condiciones controladas, aplicando un barrido de ángulos predefinido para obtener el patrón de difracción característico de los minerales presentes en la muestra procedimiento conforme figura 21. Los datos obtenidos fueron registrados y el procesamiento se realizó con el software High Score Plus, el cual permitió la identificación de las fases minerales comparando los picos de difracción con bases de datos cristalográficas.

Figura 21 – Procedimiento de preparación y ensayo de rayos x

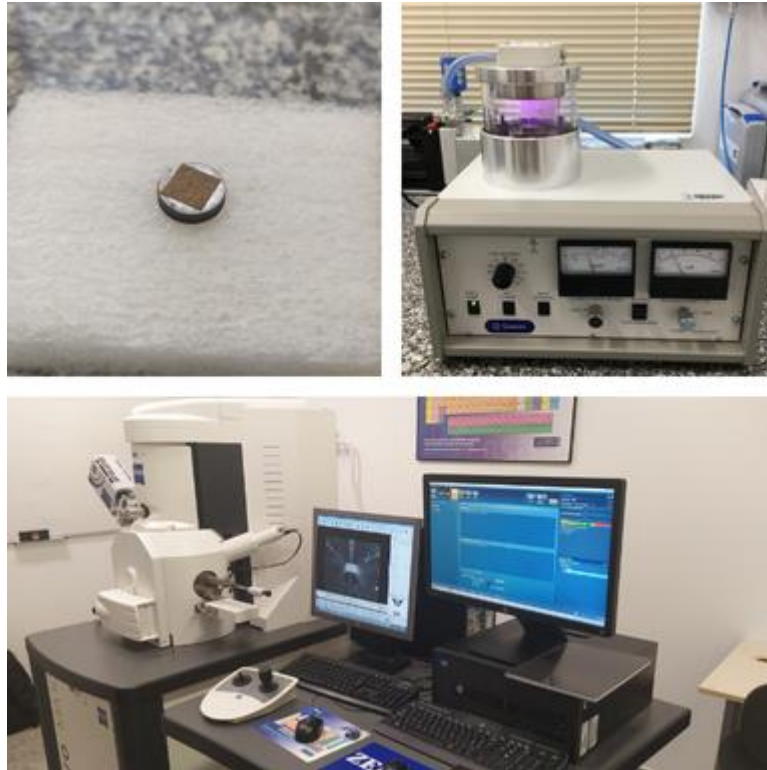


Fuente: Autor (2024).

- **Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)**

El análisis se realizó utilizando el microscopio electrónico de barrido ZEISS EVO 10, siguiendo los protocolos establecidos por el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (LMEV) conforme figura 22. Las muestras secas se fragmentaron mecánicamente hasta obtener partículas de tamaño adecuado para el análisis. Posteriormente, se recubrieron con una capa fina de oro mediante pulverización catódica (sputtering) para mejorar la conductividad eléctrica y evitar efectos de carga durante la observación. Las imágenes y datos obtenidos se registraron digitalmente y se procesaron mediante el software de análisis ZEISS SmartSEM, lo que permitió identificar estructuras morfológicas, defectos superficiales y características superficiales del material.

Figura 22 – a) muestra de material, b) equipo de pulverización catódica, c) Microscopio ZEISS EVO 10



Fuente: Autor (2024).

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de Espectroscopia de Rayos X por Dispersión de Energía (EDS/EDX) acoplado al microscopio electrónico, con el objetivo de determinar la composición elemental del material, Los espectros obtenidos se procesaron con el software del equipo, permitiendo identificar y mapear la distribución de los elementos en la muestra.

4.3.3 Dosificación de las Mezclas

Las mezclas se prepararon con proporciones del 5%, 10% y 15% de residuos de mortero reciclado (RRM) en relación con la masa del suelo seco, con el objetivo de evaluar la estabilidad volumétrica. Para garantizar una distribución homogénea del RRM, los materiales se mezclaron en seco mediante agitación mecánica durante 5 minutos. Posteriormente, se añadió agua destilada hasta alcanzar la humedad óptima previamente determinada como detallado en la figura 23.

Figura 23 – Dosificación de suelo – RRM.



Fuente: Autor (2024).

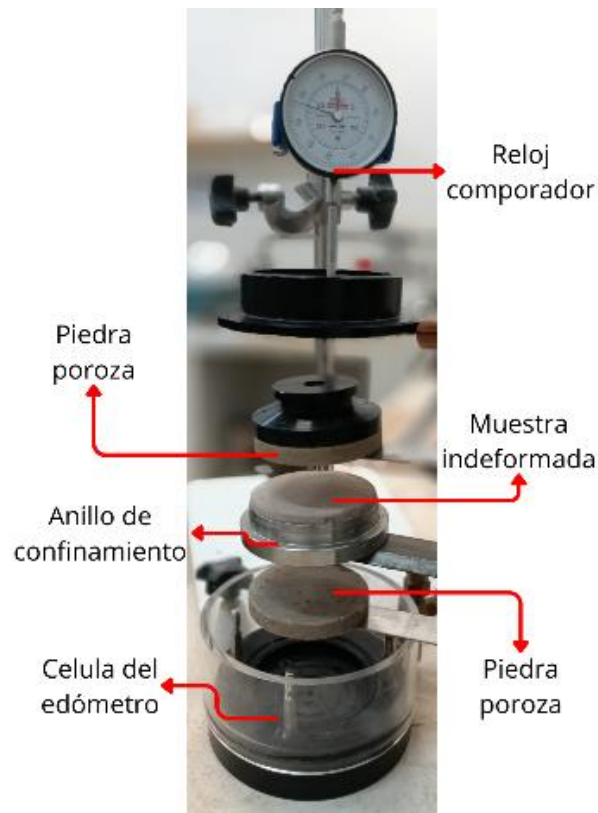
Las muestras se compactaron en moldes cilíndricos de acero inoxidable de 34 mm de diámetro × 20 mm de altura, aplicando una energía de compactación adecuada para obtener una densidad seca aproximada. Finalmente, las muestras fueron curadas en bolsas herméticas a temperatura ambiente ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) durante 7 días, con el propósito de mantener una humedad constante antes de la realización de los ensayos.

4.3.4 Ensayos de Desempeño

- **ENSAYO DE EXPANSION LIBRE.**

El ensayo fue realizado de acuerdo con ASTM 4546 métodos A, Standard Test Methods for One-Dimensional Swell or Collapse of Soils. Conforme la figura 24 El ensayo comenzó colocando las muestras de suelo dentro de unas células de edómetro convencionales, con la opción de confinar la muestra en un anillo de acero inoxidable rígido para garantizar estabilidad durante la prueba, y dos piedras porosas. Luego, se posicionó un reloj comparador en la parte superior de los cuerpos de prueba para medir cualquier deformación a lo largo del tiempo.

Figura 24 – Esquema del Ensayo de Expansión Libre



Fuente: Autor (2024).

El ensayo consistió en la medición del hinchamiento libre, expresado como el porcentaje de expansión en relación con el espesor inicial de la muestra. Para minimizar errores en la medición de deformaciones, se colocó el lector de deformación directamente sobre el material. Después de la inundación se controló la variación de la altura vs el tiempo en intervalos de 30 s, 1 min, 2 min, 4 min, 8 min, así sucesivamente hasta los 7 días, para analizar múltiples muestras fueron realizadas adaptaciones conforme figura 25, manteniendo el esquema presentado en la figura 24. Finalmente, los datos obtenidos fueron analizados y representados en gráficas, permitiendo evaluar la variación volumétrica del suelo en función del tiempo de exposición al agua.

Figura 25 – Adaptación del esquema anterior para fines de ensayo múltiple.



Fuente: Autor (2024).

- **Ensayo de presión de expansión** – ASTM D4546 - Método C

El ensayo se adaptó de la norma ASTM D4546 - Método C (presión de hinchamiento a deformación constante), ajustándose para ejecutarse en un oedómetro convencional bajo el principio de volumen constante ($\Delta h = 0$). Para ello, se utilizaron especímenes remodelados en laboratorio conforme figura 26, los cuales fueron colocados cuidadosamente en el anillo del oedómetro. Tras registrar los datos iniciales, se aplicó una carga mínima con el fin de fijar la muestra sin alterar su estructura interna.

Figura 26 – procedimiento de remoldado de material



Fuente: Autor (2024).

Posteriormente, se aplicaron cargas manuales incrementales, ajustando la presión de forma continua para mantener la deformación vertical en cero ($\Delta h = 0$), tal como establece la modificación del Método C. Este proceso requirió monitoreo constante de la presión y la deformación hasta alcanzar la estabilización de la muestra, garantizando la coherencia con los criterios técnicos de la norma referenciada, en la figura 27 se observa la muestra y el equipamiento de ensayo.

Figura 27 – ensayo de expansión confinada en el oedometro



Fuente: Autor (2024).

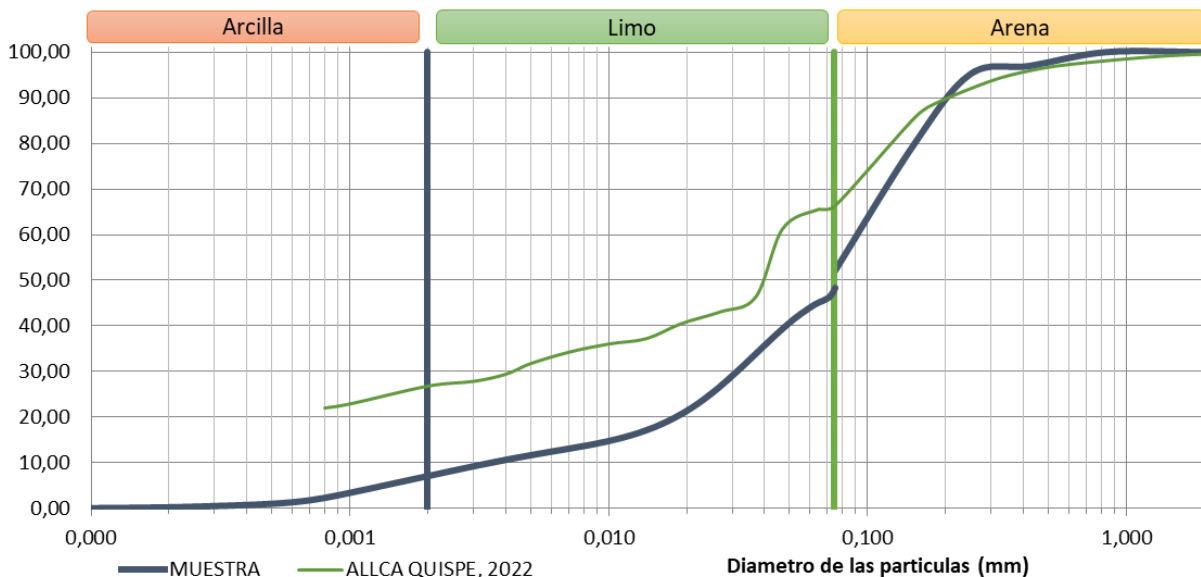
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DEL SUELO Y DEL RRM

5.1.1 Granulometría del suelo y RRM (NBR 7181/2016)

En la Figura 28 y la Figura 29 se presentan las curvas granulométricas del suelo arcilloso y de los RRM. En la Tabla 9 se observan los porcentajes de las fracciones granulométricas conforme a la NBR 6502 (ABNT, 1995). Los ensayos de tamizado y granulometría por láser evidencian la predominancia de material fino que pasa por el tamiz N° 200, registrando un 52,88 % para el suelo arcilloso y un 97,73 % para el RRM.

Figura 28 – Grafico de la granulometría del suelo arcilloso por método del hidrómetro y granulometría a laser



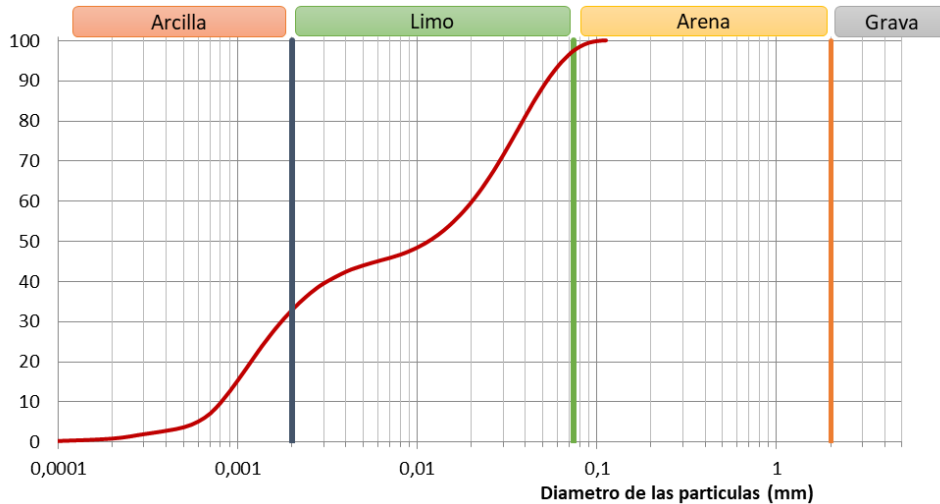
Fuente: Autor, 2024.

En la figura 29 es posible observar una tendencia similar en ambas curvas granulométricas, destacando que la curva granulométrica encontrada por Allca Quispe (2022) fue realizada mediante los métodos tradicionales de tamizaje y análisis por hidrómetro, mientras que la segunda curva corresponde a un análisis más reciente efectuado con equipamiento láser.

Se observa una variación significativa en el porcentaje de partículas finas (arcilla): un 26,83% en el análisis tradicional frente a un 6,58% obtenido mediante tecnología láser. Esta discrepancia puede atribuirse a la mayor sensibilidad y precisión del método láser, que permite una detección más exacta del tamaño de partículas sin

interferencias de sedimentación, aglomeración o errores humanos comunes en métodos manuales.

Figura 29 – Curva granulométrica a laser de los residuos reciclados de mortero (RRM).



Fuente: Autor, 2024.

Tabla 9 – Comparativo de los porcentajes de material RRM y suelo arcilloso

Fracción granulométrica	RRM	suelo arcilloso
Grava	0	0
Arena	2,37	47,12
Limo	66,91	46,3
Arcilla	30,72	6,58

Fuente: Autor, 2024.

5.1.2 Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico) (NBR 6459/2016 y NBR 7180/2016)

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 10, los valores de límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice de plasticidad (IP) obtenidos para la muestra analizada son de 30,73 %, 21,00 % y 9,73 %, respectivamente. Se observa una diferencia significativa en el límite líquido entre las dos muestras (30,73 % frente a 49 %), lo cual se correlaciona con la diferencia en el contenido de fracción arcillosa representado en la Figura 28. Esta variación indica una mayor plasticidad y potencial de retención de agua en la muestra con mayor porcentaje de arcilla.

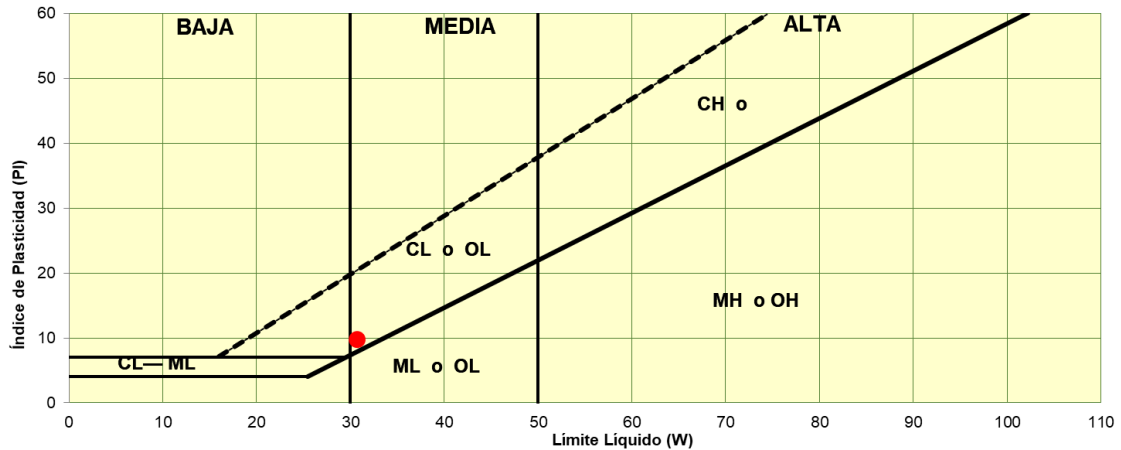
Tabla 10 – Resultados para los ensayos de límites de Atterberg.

RESULTADOS		ALLCA QUISPE, 2022
LL	30,73	49
LP	21,00	25
IP	9,73	24

Fuente: Autor, 2024.

En cuanto al potencial de expansión, y de acuerdo con la Tabla 5, un límite líquido de 30,73 % indica un potencial de expansión medio, lo cual debe ser considerado en el diseño y estabilización del suelo. Finalmente, según la clasificación del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), las muestras analizadas se clasifican como arcilla de baja plasticidad (CL), como se observa en la Figura 30.

Figura 30 – Sistema Unificado de Clasificación de Suelo (SUCS)



Fuente: Autor, 2024.

5.1.3 Gravedad específica del suelo (NBR 6508/2017)

La determinación de la gravedad específica del suelo resultó en un valor de 2,70, indicando que el suelo arcilloso contiene minerales densos como la montmorilonita. Este valor se alinea con rangos reportados para arcillas expansivas mixtas (2,65-2,80), Braja DAS, 2001, así mismo, se encuentra entre los valores registrados en la tabla 11.

Tabla 11 – Gravedad específica media del suelo expansivos.

	Gravedad específica	MIN	MAX
BYRON STEVEN IDROVO ANGUMBA 2019	2,73	2,66	2,83
MARÍA ANGÉLICA SÁNCHEZ ALBÁN 2014	2,67	2,61	2,71

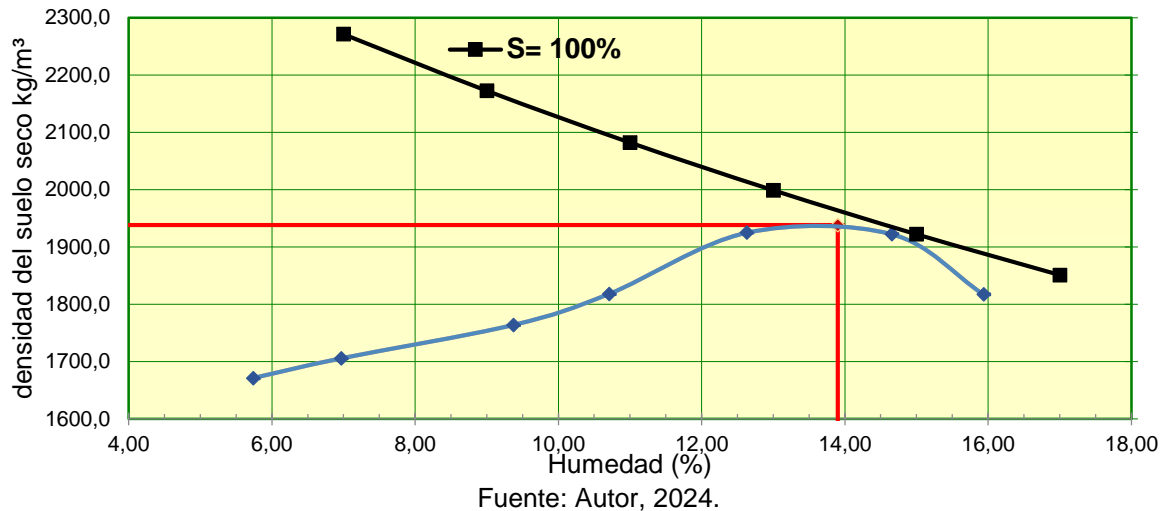
Fuente: Autor, 2024.

5.1.4 Densidad seca máxima y humedad óptima (NBR 7182:2020)

El procedimiento seguido permitió calcular la humedad óptima del suelo, determinada en 13,9 %, y una densidad seca correspondiente de 1938 kg/m³, conforme se observa en la Figura 31. Estos parámetros fueron obtenidos por una extrapolación de los datos en el punto de mayor convexidad de la curva, estos resultados obtenidos son

fundamentales para la continuidad de los ensayos, ya que permiten estimar las densidades a respecto de cada humedad

Figura 31 – curva de densidad seca por humedad del suelo arcilloso



5.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL SUELO Y RRM

5.2.1 PH del suelo y la mezcla suelo-RRM (ASTM D4972-19)

Conforme al ensayo, el suelo presentó un pH = 6,98 figura 32, valor prácticamente neutro. Según Sonon, Kissel y Saha (2022), este rango favorece la presencia de iones positivos Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^{+} en la superficie de la montmorilonita, Esta característica se vincula con la mayor atracción de moléculas de agua hacia el espacio interlamilar, lo que incrementa el espaciado basal (Yotsuji et al., 2021). Asimismo, Amiri, Esfandyari Bayat y Akbari (2025) señalan que la variación del pH es directamente proporcional a la expansión de distintos suelos arcillosos —como montmorilonita, caolinita e illita—, evidenciando la influencia significativa de este parámetro en el hinchamiento de las arcillas.

Figura 32 - Resultados de pH



Fuente: Autor, 2024.

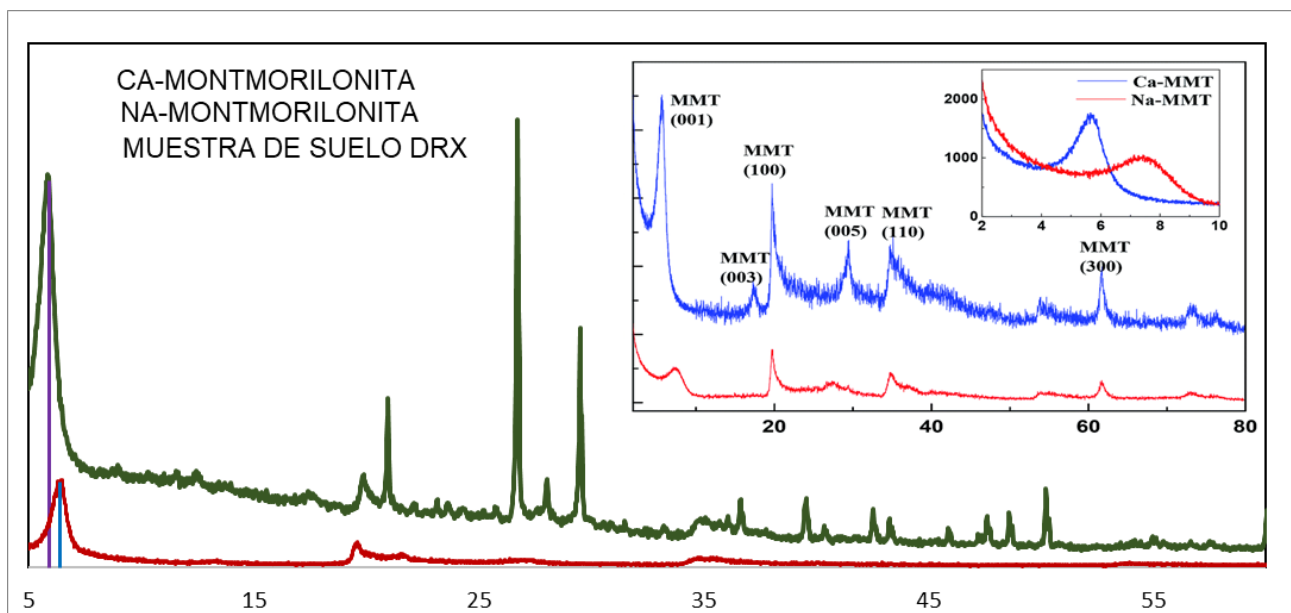
5.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA Y MICROESTRUCTURAL

5.3.1 Difracción de rayos X (DRX)

De acuerdo con la Figura 32 el gráfico representa el difractograma de rayos X correspondiente a las muestras de suelo analizadas (curva en color verde) en el cual se identifica un pico característico en $2\theta = 5,88^\circ$, este resultado contrasta con los datos reportados por Lu, Cai y Frost (2010) quienes observaron un pico en $2\theta = 5,92^\circ$ para muestras de montmorillonita cálcica, así como con los resultados de Zhang et al. (2017), quienes identificaron picos en $2\theta = 5,6^\circ$ para montmorillonita cálcica purificada.

Para la identificación de la composición de la montmorillonita, se tomó como referencia el recuadro adaptado en la Figura 32, basado en datos obtenidos por Zhang et al. (2017). En dicho recuadro se presenta una comparación entre los picos característicos de la montmorillonita sódica (Na-MMT) y la montmorillonita cálcica (Ca-MMT), los cuales también fueron identificados en el difractograma mostrado en la Figura 33.

Figura 33 – Patrones de difracción de rayos X (2θ) del suelo de Moquegua. El recuadro compara la “Ca-montmorillonita” (Ca-MMT) y la “Na-montmorillonita” (Na-MMT) (Zhang et al., 2017).



Fuente: Fuente: Elaboración propia (2025); recuadro adaptado de Zhang et al. (2017).

La Tabla 12 presenta las fases minerales identificadas en las muestras de suelo, RRM y mistura, a partir del análisis inicial realizado con el software HighScore Plus. Este procedimiento permitió identificar la presencia de albita y cuarzo en el suelo, así como

de portlandita en los residuos reciclados de mortero. Sin embargo, no fue posible determinar el tipo específico de montmorillonita presente.

Tabla 12 – fases identificadas a partir de la difracción de raíz X en las muestras de suelo y RRM

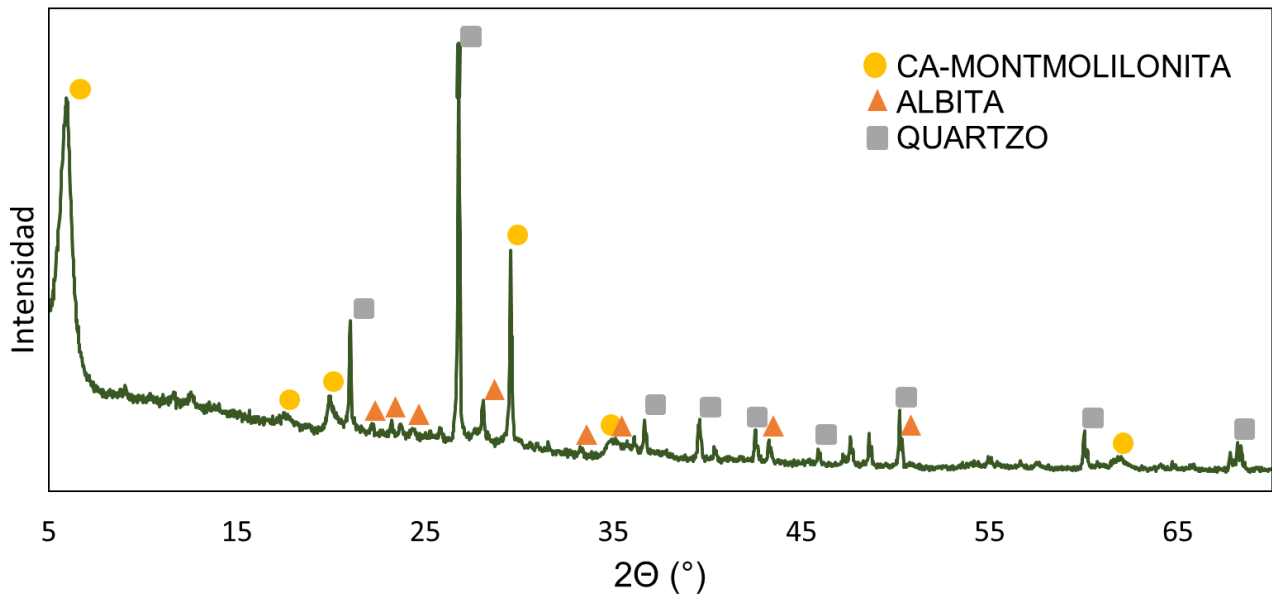
Material	Fase identificada (mineral)	Fórmula aproximada
SUELO	Quartzo	Si ₃ O ₆
	Montmorilonita	Ca _{0.33} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀
	Albita	Na ₂ Al ₂ Si ₆ O ₁₆
RRM	Portlandite	Ca ₁ O ₂ H ₂
	Quartzo	Si ₃ O ₆
	Calcita	Ca ₆ C ₆ O ₁₈
SUELO - RRM	Quartzo	Si ₃ O ₆
	Portlandite	Ca ₁ O ₂ H ₂
	Calcita	Ca ₆ C ₆ O ₁₈
	Montmorilonita	Ca _{0.33} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀
	Albita	Na ₂ Al ₂ Si ₆ O ₁₆

Fuente: Autor, 2025.

En la Tabla 12 no fue posible identificar directamente en la muestra de suelo estabilizado con RRM los subproductos derivados de las reacciones puzolánicas, como el silicato de calcio hidratado (C–S–H) o el aluminato de calcio hidratado (C–A–H). Según Richardson (2008), los geles de C–S–H presentan una estructura desordenada (cuasi amorfa) y baja cristalinidad, lo que dificulta su detección mediante difracción de rayos X (DRX), ya que generan regiones de difracción amorfa en lugar de picos agudos característicos.

Para complementar el análisis mineralógico, se llevó a cabo una comparación manual de los picos basales característicos de cada fase mineral, utilizando como referencia los patrones disponibles en la base de datos RRUFF PROJECT (s.d.). Esta evaluación dio origen a la Figura 33. Los resultados fueron contrastados con los análisis realizados por Allca Quispe (2022), identificándose algunas divergencias, tanto en la sobreposición de los picos basales como en la presencia de vermiculita en las muestras.

Figura 34 – Picos basales de montmorilonita e cuarzo en una difracción de rayos X (DRX) de un suelo arcilloso

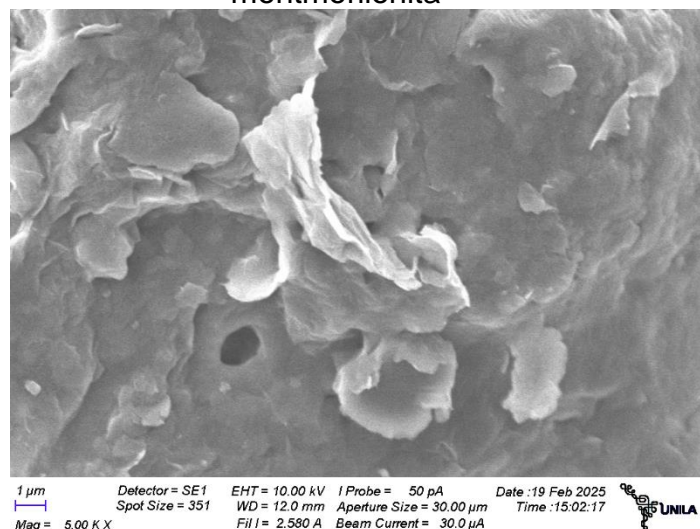


Fuente: Autor, 2025.

5.3.2 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

En la Figura 35, se observa la morfología del suelo, destacándose la presencia de paquetes de láminas con disposición desordenada y evidentes discontinuidades, características de la montmorilonita conforme observado por Nelson e Miller (1992). Estas discontinuidades favorecen la absorción de agua, según Peng *et al.* (2019) la capacidad de hidratación de los cationes ($Mg > Ca > Na > K$) influye en su capacidad de hinchamiento.

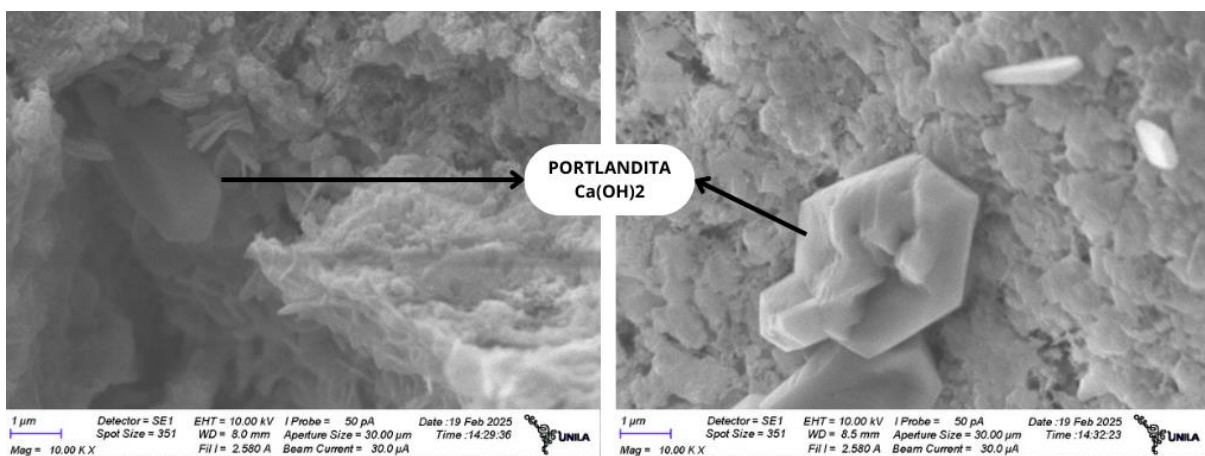
Figura 35 – Micrografía de una muestra de suelo arcilloso con presencia de montmorilonita



Fuente: Autor, 2024.

El análisis de la Figura 36 muestra estructuras cristalinas con morfología hexagonal en forma de placas planas achatadas, Según HERNANDEZ, LIZARAZO-MARRIAGA y RIVAS (2018), estas estructuras son identificadas como portlandita (hidróxido de calcio), la formación de este cristal depende del curado y el tiempo. Esta observación coincide con el análisis de la espectroscopia de dispersión de energía (EDS) revela una concentración elevada de calcio en la muestra. Ambos resultados corresponden al análisis realizado mediante MEB del residuo reciclado de mortero (RRM).

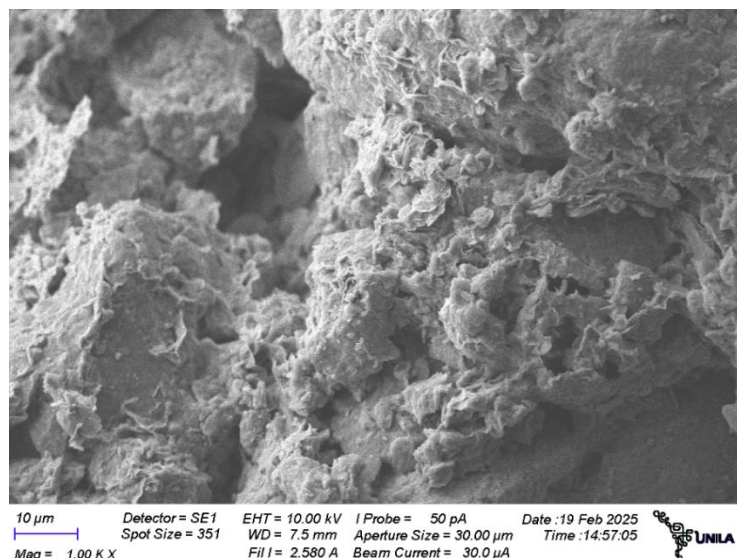
Figura 36 – Micrografía de residuos reciclados de mortero (RRM) con cristales de portlandita Ca(OH)_2 (Hidróxido de calcio)



Fuente: Autor, 2024.

La figura 37 se observa partículas con superficies irregulares y texturizadas, es esta imagen no fue posible identificar cristales bien definidos. Siendo los resultados inconclusos.

Figura 37 – Micrografía de una muestra de suelo arcilloso estabilizado con residuos reciclados de mortero (RRM)



Fuente: Autor, 2024.

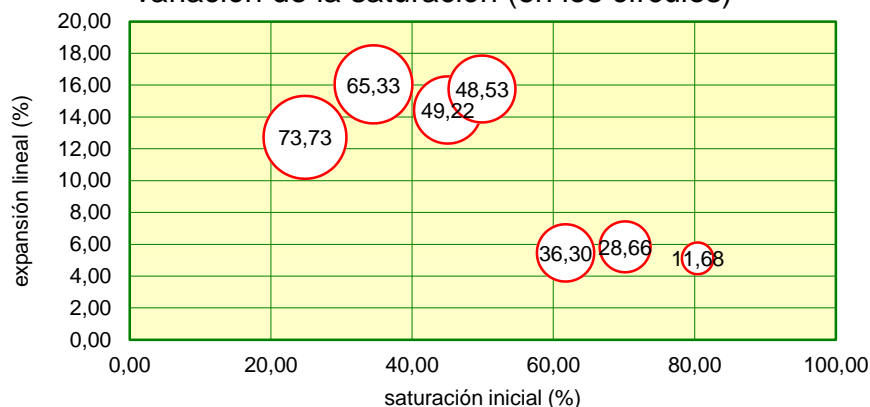
5.4 INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE RMM EN LA EXPANSIÓN DEL SUELO

5.4.1 Expansión Libre del Suelo y la Mistura (ASTM 4546)

Segun CHEN (1988), el potencial de hinchamiento de un suelo expansivo depende, fundamentalmente, del gradiente de succión matricial—fuerza con la que el suelo no saturado atrae el agua faltante—generado por la diferencia entre la saturación inicial (S_0) y la saturación final (S_f). Al re-examinar los datos de la figura 37 se observa una correlación negativa entre S_0 y la expansión: las tres muestras con $S_0 > 60\%$ y $\Delta S < 40\%$ (ensayos 5-7) exhiben una expansión media de 5,47 %, mientras que las cuatro primeras muestras ($S_0 < 50\%$, $\Delta S > 48\%$) alcanzan 14,24 %. Esta tendencia confirma que una humedad inicial elevada reduce la succión, limitando la reacción de hinchamiento.

Cabe señalar que este primer conjunto de ensayos se diseñó para definir un contenido de humedad de trabajo, manteniendo una densidad seca constante de $1708,83 \pm 51,77 \text{ kg m}^{-3}$, con el fin de garantizar la repetición de los resultados.

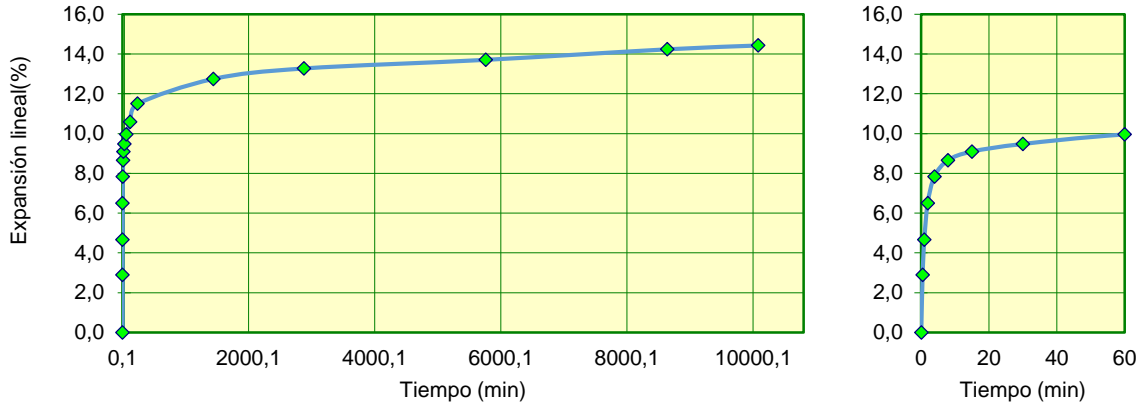
Figura 38 – Dispersión de la expansión libre versus la saturación inicial de la muestras y variación de la saturación (en los círculos)



Fuente: Autor, 2024.

En la Figura 38 aproximadamente el 65 % de la deformación lineal se desarrolla en los primeros 15 min, mientras que el 35 % restante se reparte a lo largo de 10 000 min (siete días), esta respuesta de hinchamiento en arcillas ricas en montmorilonita suele describirse mediante dos fases cinéticas: (i) una expansión inicial gobernada por la rápida adsorción de agua en la doble capa difusa- y (ii) una etapa lenta controlada por la difusión interna y la redistribución de cationes intercambiables (NELSON; MILLER, 1992).

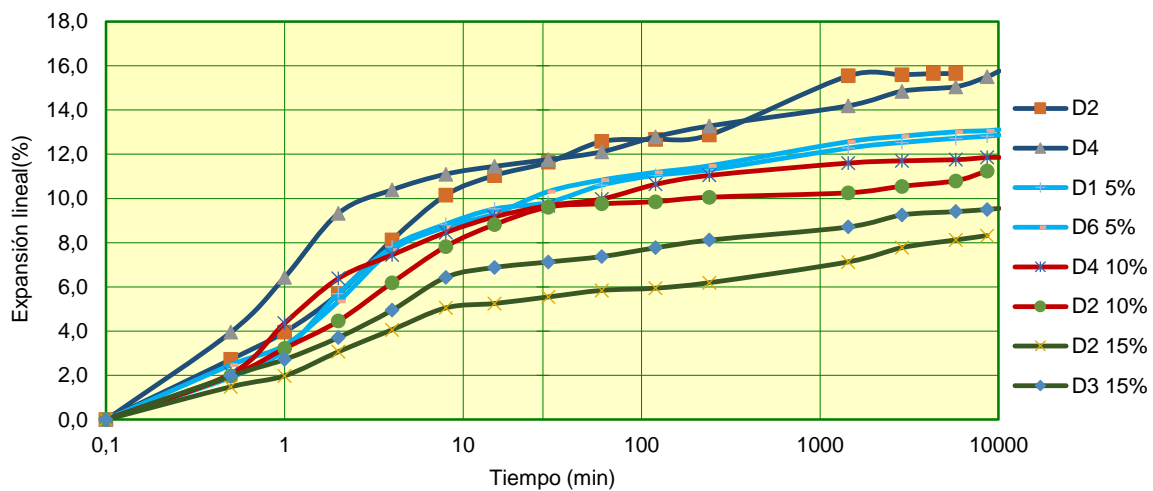
Figura 39 – Izquierda, comportamiento de la expansión libre durante todo el ensayo, derecha, comportamiento de la muestra en los primeros 60 min.



Fuente: Autor, 2024.

Conforme la figura 39 el ensayo de expansión libre confirmó que la incorporación incremental de residuo reciclado de mortero RRM influye en la atenuación de la expansión lineal del suelo: las muestras con 0 % RRM presentaron una expansión media de **15,74 %**, clasificado como altamente expansivo en tanto que las mezclas con **5 %, 10 % y 15 %** de RRM alcanzaron **12,98 %, 11,64 % y 8,92 %**, lo que implica reducciones relativas de la expansión de **17,4 %, 26,1 % y 43,3 %** respectivamente. Estos valores sitúan el suelo tratado con 15 % de RRM en la categoría de **expansividad moderada** según la clasificación de SEED y MITCHELL (1962)

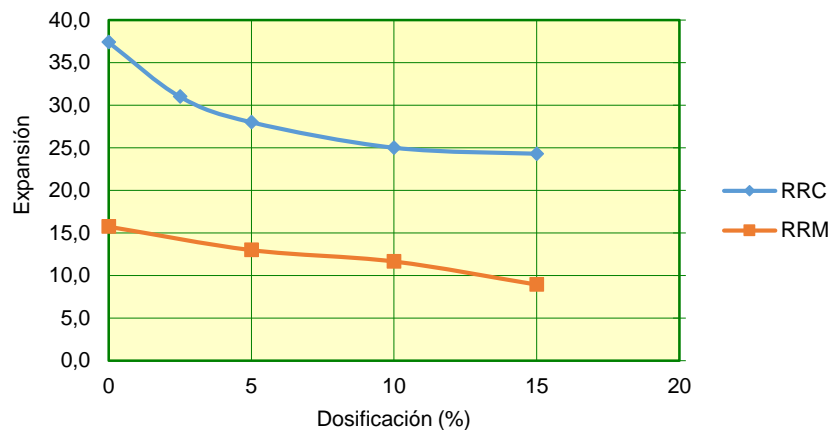
Figura 40 – Curvas de expansión libre para diferentes proporciones de RRM



Fuente: Autor, 2024.

. Conforme al figura 40, es posible observar la disminución de la expansión en función del porcentaje de RRM y RCA (Agregado de Concreto Reciclado fino), registrándose una reducción del 43,3 % para la mezcla con 15 % de RRM y de 35,03 % para la mezcla con RCA. Según Ujile y Abbey (2022, p. 7), las partículas menores a 0,42 mm contribuyen al aumento de la estabilidad del suelo debido a las propiedades auto aglomerantes de las fracciones finas.

Figura 41 – Comparación del ensayo de expansión libre con la curva de estabilización con RRC de león (2024).



Fuente: Adaptado de Leon (2024)

5.4.2 Potencial de Expansión del Suelo y la Mistura (ASTM D4546 - Método C)

Los resultados obtenidos en el ensayo de expansión confinada evidencian según la tabla 13, que la incorporación de residuos reciclados de mortero (RRM) en un 15% reduce significativamente la presión de expansión del suelo, pasando de 244,32 kPa suelo natural a 110,34 kPa, lo que implica una reducción del 54,92% en la presión de expansión de suelo arcilloso, ambas muestras tuvieron una saturación final media de 98,04 % y sus parámetros de densidad seca inicial y humedad aproximadas.

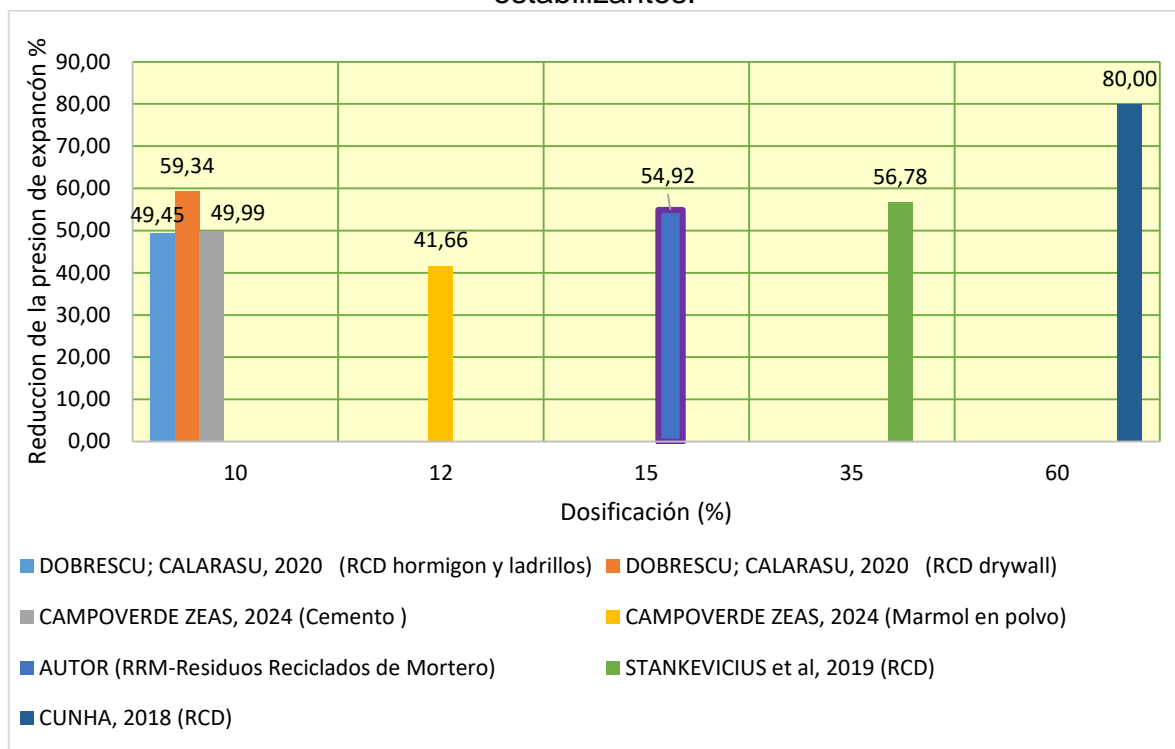
Tabla 13 – Resultados de la presión de expansión conforme el edómetro

Muestra	humedad inicial	humedad final	saturación inicial	saturación final	Dens. del suelo seco inicial	Dens. del suelo seco final	Presión de expansión
	%	%	%	%	kg/m ³	kg/m ³	Kpa
100% de S	9,25	21,14	43,08	98,41	1709,23	1.709,23	244,32
85% de S + 15% de RRM	10,73	20,15	52,03	97,68	1734,42	1.734,42	110,34

Fuente: Autor, 2025.

Estos hallazgos coinciden con otros estudios internacionales que evaluaron residuos reciclados de construcción y demolición (RCD) como estabilizantes, mostrando reducciones importantes en la presión de expansión conforme figura 41, donde Dobrescu y Calarasu (2020) reportaron disminuciones de hasta 59,34% empleando residuos de Drywall y 49,45% con hormigón y ladrillos. Cunha (2018), en Brasil, obtuvo una significativa reducción del 80% en presión de expansión al utilizar una alta dosificación de 60% de RCD. Igualmente, Stankevicius et al. (2019) lograron una disminución del 56,78% con un 35% de RCD.

Figura 42 – Reducción de la presión de expansión conforme diferentes dosificaciones y estabilizantes.



Fuente: Autor (2025)

Comparativamente, Campoverde Zeas (2024) en Ecuador demostró que el uso de materiales finos como cemento y mármol en polvo, aunque con valores absolutos menores, también logra disminuir el potencial expansivo en aproximadamente 50% y 41,66%, respectivamente. Estas referencias destacan la viabilidad técnica del uso de residuos reciclados como estabilizantes efectivos, contribuyendo a la sostenibilidad en el manejo de desechos constructivos.

6 CONCLUSIONES

Esta investigación demuestra la viabilidad técnica del uso de residuos reciclados de mortero (RRM) como agente estabilizante para suelos arcillosos expansivos en el centro poblado de San Antonio, Moquegua. A lo largo del estudio se realizó una caracterización integral del suelo nativo, en el cual se identificó la presencia de montmorilonita cálcica y de portlandita residual en las muestras de RRM fino. Para ello, se aplicaron ensayos estandarizados de granulometría láser, límites de Atterberg, difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

Con base en estos análisis se formularon mezclas suelo-RRM de 5 %, 10 % y 15 % en masa, compactadas a humedad óptima, lo que permitió cuantificar variaciones en densidad seca, índice de vacíos y resistencia mecánica, así como medir el comportamiento expansivo mediante ensayos de expansión libre y presión de hinchamiento. La adición del 15 % de RRM redujo la expansión lineal aproximadamente un 40 % y la presión de hinchamiento más del 50 %, reclasificando el material de “altamente expansivo” a “medio expansivo”, mecanismos que mejoraron la estabilidad volumétrica y la capacidad portante del suelo.

La relevancia de estos estudios se amplifica frente al escenario de creciente frecuencia de lluvias intensas asociadas al fenómeno El Niño costero, que incrementa la humedad en los perfiles del suelo y exacerba los problemas de expansión y colapso. En este contexto, La estabilización con residuos reciclados de mortero representa una solución eficaz desde el punto de vista técnico y sostenible brindando un destino útil para los residuos de construcción y demolición.

Así, este estudio contribuye al avance de soluciones técnicas sostenibles para suelos problemáticos en regiones vulnerables, demostrando la eficacia del RRM como estabilizante alternativo. Asimismo, se recomienda un estudio in-situ de los ciclos de expansión y contracción de los suelos de la región y estabilización con residuos de construcción y demolición de la ciudad de San Antonio de Moquegua.

7 REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2022.

ALLCA QUISPE, A. L. **Caracterización de suelo con evidencias de elevada presión de expansión en el centro poblado de San Antonio, Moquegua – Perú**. 76 f. Trabajo de Conclusión de Curso – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2022. Trabajo não publicado.

ALOMÍA, Camila. **Fenómeno El Niño en Perú 2023-2024: ¿qué efectos tendrá y cómo sería si es de categoría extraordinaria?** *La República*, Lima, 10 nov. 2023.

AL-RAWAS, A. A.; GOOSEN, M. F. A. **Expansive soils: recent advances in characterization and treatment**. Londres: Taylor & Francis, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4318-17: **Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils**. West Conshohocken, 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4546-21: **Standard test methods for one-dimensional swell or collapse of soils**. West Conshohocken, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4829-21: **Standard test method for expansion index of soils**. West Conshohocken, 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E1508-19: **Standard guide for quantitative analysis by energy-dispersive spectroscopy**. West Conshohocken, 2019.

AMIRI, S.; ESFANDYARI BAYAT, A.; AKBARI, S. **Swelling characteristics of various clays in presence of an aqueous environment under different conditions**. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2025, v. 707, p. 135942.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6549:1984. **Solo – Determinação do limite de liquidez**. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181:2016. **Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004. **Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12253:1992. **Solo-cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento**. Rio de Janeiro, 1992.

ATTOM, M. F. The effect of compactive energy level on some soil properties. **Applied Clay Science**, v. 12, n. 1-2, p. 61-72, 1997.

BARBOSA, V. **Estudo do comportamento geotécnico de um solo argiloso de**

Cabrobó potencialmente expansivo estabilizado com cal. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013.

BASTISTA, V. S. **Potencial do uso de resíduo de mineração de rocha calcária para estabilização de solos expansivos.** 2021. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

BOBADILLO, J.; RODRÍGUEZ, R. **Mecánica de suelos. Tomo 1: fundamentos de la mecánica de suelos.** Ciudad de México: Limusa, 2005.

BORGES, F. E. **Contribuição à metodologia para determinação da pressão de expansão em solos e rochas.** 1981. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

CAMPOVERDE ZEAS, B. F. **Caracterización y estabilización de suelos expansivos en la zona de Challuababa y Miraflores de la ciudad de Cuenca.** 2024. Trabajo de Titulación (Ingeniería Civil) – Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, 2024.

CASTRO, C. V., M. E. **Suelos expansivos en Talara.** 1992. Tesis (Ingeniería Civil) – Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, 1992.

CHEN, F. H. **Foundations on expansive soils.** 2. ed. Amsterdam: Elsevier, 1988.

CONAMA. Resolução nº 307, de 5 jul. 2022. **Define diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil.**

CUNHA, C. E. A. **Avaliação da utilização de resíduos da construção civil reciclados na redução da pressão de expansão de um solo colapsível da região de São Cristóvão/SE.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

DOBRESCU, C. F.; CALARASU, E. A. Engineering and environmental benefits of using construction wastes in ground improvement works. **MATEC Web of Conferences**, v. 310, p. 00024, 2020.

EUROPEAN UNION. **Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives.** *Official Journal of the European Union*, L 312, p. 3-30, 22 nov. 2008.

FONDJO, A. A.; THERON, E.; RAY, R. P. Stabilization of expansive soils using mechanical and chemical methods: a comprehensive review. **Civil Engineering and Architecture**, v. 9, p. 1295-1308, 2021.

FIROOZI, A. A.; OLGUN, C. G.; BAGHINI, M. S. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 11, p. 1-17, 2020.

GALÁN, P. **Las arcillas: clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales.** Ciudad de México: Sociedad Geológica Mexicana, 1964.

GARAY, I. O. B. **Caracterización de residuos de construcción de Lima y Callao**

(estudio de caso). 2018. Tesis (Ingeniería Civil) – Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2018.

GOOGLE LLC. **Google Earth Pro** (versión 7.3.4) [programa de computador]. Mountain View, CA: Google, 2025.

GONDIM, L. M. **Estudo experimental de misturas solo-emulsão aplicadas às rodovias do Agropolo do Baixo Jaguaribe/CE**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

HOLGADO, K. L. C. et al. **Caracterización de arcillas expansivas y mitigación de riesgos**. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, 2021.

HOLTZ, W. G.; GIBBS, H. J. Engineering properties of expansive clays. **Transactions of the ASCE**, v. 121, p. 641-663, 1956.

HURTADO, A. J. **Suelos expansivos y colapsables**. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 1988.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil stabilization: principles and practice**. Sydney: Butterworths, 1972.

JONES, L.; JEFFERSON, I. **Expansive soils**. Birmingham: ICE Publishing, 2012.

JOSEPH, E. Boules. **Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil**. Naucalpan: McGRAW-HILL, 1981.

LEON LEE, P. Effects of quarry and recycled concrete waste as rapid-use stabilizers for clay soils. **LACCEI INTERNATIONAL MULTI-CONFERENCE FOR ENGINEERING, EDUCATION AND TECHNOLOGY**, 22., 2024, San José.

LU, Longfei; CAI, Jingong; FROST, Ray L. Desorption of stearic acid upon surfactant adsorbed montmorillonite: a thermogravimetric study. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Dordrecht, v. 100, n. 1, p. 141–144, 2010.

MEDINA, J. **Apostila de estabilização de solos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1987.

MITCHELL, J. K.; SOGA, K. **Fundamentals of soil behavior**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

MORENO PÉREZ, Emiliano. **Estabilización de suelos arcillosos con residuos de la construcción y demolición**. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais) – Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciências Básicas e Engenharia, México, 2018.

NAMICELA GUALÁN, I.; BIZARRETA ORTEGA, A. Evolución tectosedimentaria de la Cuenca Moquegua y su influencia en los suelos expansivos del sur peruano. **Revista Peruana de Geología**, 2019.

NELSON, J. D.; MILLER, D. J. **Expansive soils: problems and practice in foundation**

and pavement engineering. New York: John Wiley & Sons, 1992.

NELSON, J. D.; CHAO, K. C.; OVERTON, D. D.; NELSON, E. J. Foundation engineering for expansive soils. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.

OLIVEIRA, M. E. D. et al. **Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE.** Fortaleza: [s.n.], 2011.

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à mecânica dos solos dos estados críticos.** 3. ed. Rio de Janeiro: Terratek, 2007.

PENG, J. et al. Driving force for the swelling of montmorillonite as affected by surface charge and exchangeable cations: a molecular dynamic study. **Results in Physics**, v. 12, p. 113-117, 2019. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.11.011.

PERINA, J. M.; TRANNIN, I. C. B. **Proposta para aproveitamento de resíduos da construção civil gerados em canteiros de obras.** XL International Sodebras Congress. Volume 14, no 59. Vitória. 2019.

PERU. Decreto Supremo nº 002-2022-VIVIENDA, de 4 abr. 2022. **Aprueba el Reglamento de Gestión y Manejo de Residuos Sólidos de la Construcción y Demolición.** *El Peruano*, Lima, 5 abr. 2022.

RICHARDSON, I. G. The nature of C-S-H in hardened cements. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 2, p. 137-158, 2008.

RRUFF PROJECT. Albite R100169 $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$. Tucson, **AZ: Department of Geosciences**, University of Arizona, [s.d.]. Base de datos RRUFF.

RRUFF PROJECT. Montmorillonite R110052 $(\text{Na,Ca})_0,3(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Tucson, **AZ: Department of Geosciences**, University of Arizona, [s.d.]. Base de datos RRUFF.

RRUFF PROJECT. Portlandite R070210 $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Tucson, **AZ: Department of Geosciences**, University of Arizona, [s.d.]. Base de datos RRUFF.

RRUFF PROJECT. Quartz R040031 SiO_2 . Tucson, **AZ: Department of Geosciences**, University of Arizona, [s.d.]. Base de datos RRUFF.

SEED, H. B. et al. Prediction of swelling potential for compacted clays. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division**, v. 88, n. 3, p. 53-87, 1962.

SILVA, G. T. M. et al. Resíduos de construção e demolição em tecnologia de concreto: uma revisão. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, p. 16120-16147, 2020.

SKEMPTON, A. W. The colloidal "activity" of clays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3., 1953, Zurich. *Proceedings...* Zurich: ETH, 1953. p. 57-61.

SONON, L. S.; KISSEL, D. E.; SAHA, U. **Cation exchange capacity and base**

saturation. Circular 1040. Athens: University of Georgia Cooperative Extension, 2022.

STANKEVICIUS, P. M.; BENEVIDES, B. N.; ANGULO, S. C.; BOSCOV, M. E. G. Estabilização de solo expansivo com material escarpado de resíduos de construção civil. In: GEOSUL 2019 – XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 17-19 out. 2019, Joinville. *Anais...* São Paulo: ABMS, 2019.

UJILE, M. C.; ABBEY, S. J. The use of fine portions from construction and demolition waste for expansive soil stabilization: a review. **Frontiers of Structural and Civil Engineering**, v. 16, n. 6, p. 1066-1081, 2022.

YOTSUJI, K.; TACHI, Y.; SAKUMA, H.; KAWAMURA, K. Effect of interlayer cations on montmorillonite swelling: comparison between molecular dynamic simulations and experiments. **Applied Clay Science**, v. 204, p. 106034, 2021.

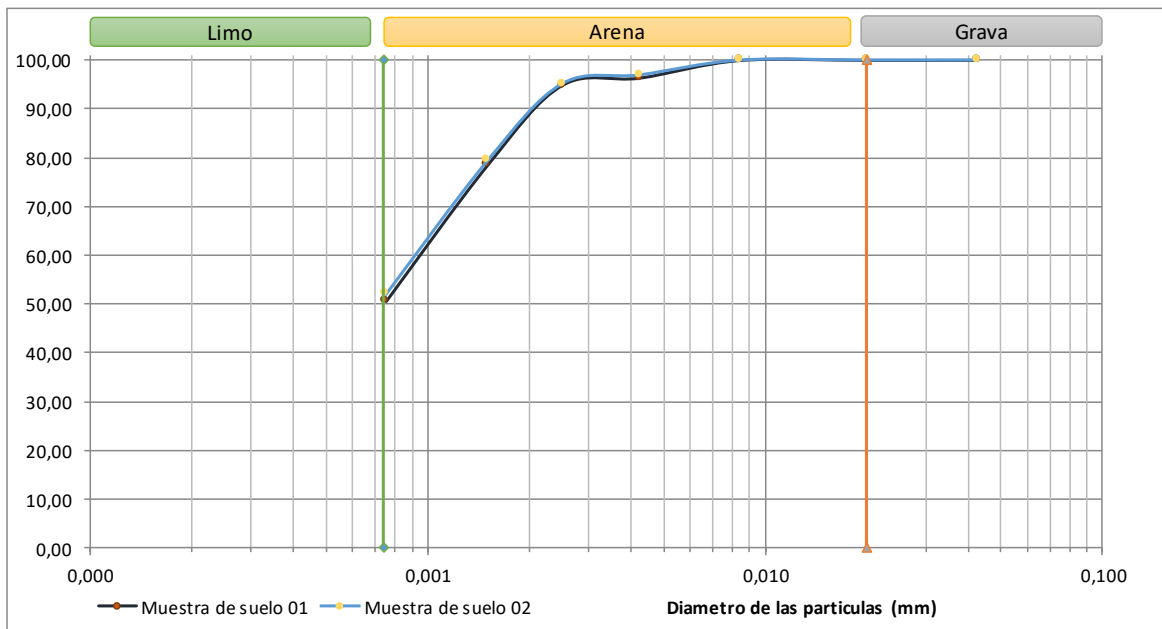
ZHANG, Xian; YI, Hao; BAI, Haoyu; ZHAO, Yunliang; MIN, Fanfei; SONG, Shaoxian. Correlation of montmorillonite exfoliation with interlayer cations in the preparation of two-dimensional nanosheets. **RSC Advances**, Cambridge, v. 7, p. 41471-41478, 2017.

8 ANEXOS

ANEXO A – RESULTADOS COMPLEMENTARES ENSAYO DE GRANULOMETRIA

ANALISE GRANULOMÉTRICA

		Muestra 01 130,00				Muestra 02 122,00			
Peneiras	mm	Peso Retenido Acumulado	Peso Retenido	Peso Pasante	% Total Pasante	Peso Retenido Acumulado	Peso Retenido	Peso Pasante	% Total Pasante
4,000	4,250	0,00	0,00	130,00	100,00	0,00	0,00	122,00	100,00
10,000	2,000	0,00	0,00	130,00	100,00	0,01	0,01	121,99	99,99
16,000	0,840	0,01	0,01	129,99	99,99	0,05	0,04	121,95	99,96
40,000	0,425	3,93	3,92	126,07	96,98	4,44	4,39	117,56	96,36
50,000	0,250	6,25	2,32	123,75	95,19	6,25	1,81	115,75	94,88
100,000	0,150	26,67	20,42	103,33	79,48	26,20	19,95	95,80	78,52
200,000	0,075	62,21	35,54	67,79	52,15	60,20	34,00	61,80	50,66
fundo		130,00	67,79		0,00	122,00	61,80		0,00



GRANULOMETRIA LASER SUELO

Diameter values array	Cumulative values array	DIAMETRO mm
0,01	0	0,00001
0,04	0,18	0,00004
0,07	0,19	0,00007
0,1	0,23	0,0001
0,2	0,62	0,0002
0,3	1,19	0,0003
0,4	1,7	0,0004
0,5	2,22	0,0005
0,6	2,92	0,0006
0,7	3,81	0,0007
0,8	4,91	0,0008
0,9	6,05	0,0009
1	7,15	0,001
1,1	8,18	0,0011
1,2	9,14	0,0012
1,3	10,03	0,0013
1,4	10,85	0,0014
1,6	12,33	0,0016
1,8	13,61	0,0018
2	14,77	0,002
2,2	16	0,0022
2,4	17	0,0024
2,6	18	0,0026
3	19	0,003
4	22	0,004
5	24	0,005
6	26	0,006
6,5	27	0,0065
7	27	0,007
7,5	28	0,0075
8	28	0,008
8,5	29	0,0085
9	30	0,009
10	30,64	0,01
11	31,8	0,011
12	33,01	0,012
13	34,26	0,013
14	35,56	0,014
15	36,91	0,015

GRANULOMETRIA LASER MORTERO

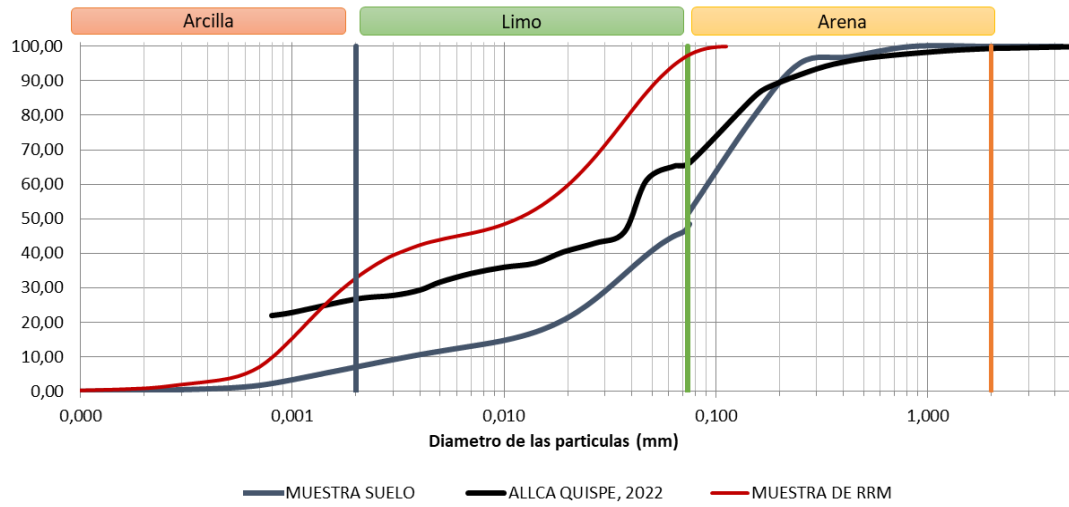
Diameter values array	Cumulative values array	DIAMETRO mm
0,01		0,00001
0,04	0,27	0,00004
0,07	0,27	0,00007
0,1	0,27	0,0001
0,2	0,88	0,0002
0,3	1,98	0,0003
0,4	2,83	0,0004
0,5	3,71	0,0005
0,6	5,12	0,0006
0,7	7,13	0,0007
0,8	9,83	0,0008
0,9	12,68	0,0009
1	15,47	0,001
1,1	18,09	0,0011
1,2	20,51	0,0012
1,3	22,71	0,0013
1,4	24,69	0,0014
1,6	28,04	0,0016
1,8	30,72	0,0018
2	32,92	0,002
2,2	35	0,0022
2,4	36	0,0024
2,6	38	0,0026
3	40	0,003
4	42	0,004
5	44	0,005
6	45	0,006
6,5	45	0,0065
7	46	0,007
7,5	46	0,0075
8	47	0,008
8,5	47	0,0085
9	48	0,009
10	48,48	0,01
11	49,48	0,011
12	50,52	0,012
13	51,61	0,013
14	52,74	0,014
15	53,89	0,015

GRANULOMETRIA LASER SUELO

Diameter values array	Cumulative values array	DIAMETRO mm
16	38,31	0,016
17	39,75	0,017
18	41,23	0,018
19	42,74	0,019
20	44,28	0,02
22	47,43	0,022
25	52,25	0,025
28	57,05	0,028
32	63,19	0,032
36	68,85	0,036
38	71,48	0,038
40	73,97	0,04
45	79,57	0,045
50	84,27	0,05
53	86,67	0,053
56	88,79	0,056
63	92,69	0,063
71	95,76	0,071
75	96,86	0,075
80	97,92	0,08
85	98,7	0,085
90	99,24	0,09
95	99,58	0,095
100	99,8	0,1
106	99,94	0,106
112	100	0,112
125	100	0,125
130	100	0,13
140	100	0,14
145	100	0,145
150	100	0,15
160	100	0,16
170	100	0,17
180	100	0,18
190	100	0,19
200	100	0,2
212	100	0,212
242	100	0,242
250	100	0,25
300	100	0,3
400	100	0,4
500	100	0,5
600	100	0,6
700	100	0,7
800	100	0,8
900	100	0,9
1000	100	1
1100	100	1,1
1200	100	1,2
1300	100	1,3
1400	100	1,4
1500	100	1,5
1600	100	1,6
1700	100	1,7
1800	100	1,8
1900	100	1,9
2000	100	2
2100	100	2,1
2200	100	2,2
2300	100	2,3
2400	100	2,4
2500	100	2,5

GRANULOMETRIA LASER MORTERO

Diameter values array	Cumulative values array	DIAMETRO mm
16	55,06	0,016
17	56,24	0,017
18	57,43	0,018
19	58,63	0,019
20	59,83	0,02
22	62,23	0,022
25	65,81	0,025
28	69,28	0,028
32	73,65	0,032
36	77,66	0,036
38	79,53	0,038
40	81,3	0,04
45	85,26	0,045
50	88,52	0,05
53	90,19	0,053
56	91,67	0,056
63	94,51	0,063
71	96,81	0,071
75	97,63	0,075
80	98,43	0,08
85	99,01	0,085
90	99,42	0,09
95	99,68	0,095
100	99,84	0,1
106	99,96	0,106
112	100	0,112
125	100	0,125
130	100	0,13
140	100	0,14
145	100	0,145
150	100	0,15
160	100	0,16
170	100	0,17
180	100	0,18
190	100	0,19
200	100	0,2
212	100	0,212
242	100	0,242
250	100	0,25
300	100	0,3
400	100	0,4
500	100	0,5
600	100	0,6
700	100	0,7
800	100	0,8
900	100	0,9
1000	100	1
1100	100	1,1
1200	100	1,2
1300	100	1,3
1400	100	1,4
1500	100	1,5
1600	100	1,6
1700	100	1,7
1800	100	1,8
1900	100	1,9
2000	100	2
2100	100	2,1
2200	100	2,2
2300	100	2,3
2400	100	2,4
2500	100	2,5

ANALISE GRANULOMÉTRICA A LASER

ANEXO B – RESULTADOS COMPLEMENTARES ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SÓLIDOS

Gravedad Específica de los Sólidos (Gs)

número do picnómetro	N°	-		1	2
peso del picnómetro	g	a		96,41	96,41
suelo seco + cápsula	g	b		63,93	69,96
Peso de la cápsula	g	c		15,27	17,27
peso del suelo	g	d	b-c	48,66	52,69
peso del picnómetro + água	g	e		586,53	587,53
peso del água	g	f	e-a	490,12	491,12
peso del picnómetro + suelo + água	g	g		617,20	620,75
volumen de agua no deslocada	g	h	g - a-d	472,13	471,65
volumen de agua deslocada	g	i	f - h	17,99	19,47
massa específica real (densidade)		j	d / i	2,705	2,706
temperatura del água (aproximación 1,0°C)		k		19,7	20,1
factor de corrección		l	TABELA	0,9983	0,9982
Gravedad Específica de los Sólidos		m	j * l	2,7002	2,7013

$$G_s = \frac{W_2 - W_1}{(W_2 - W_1) - (W_3 - W_4)}$$

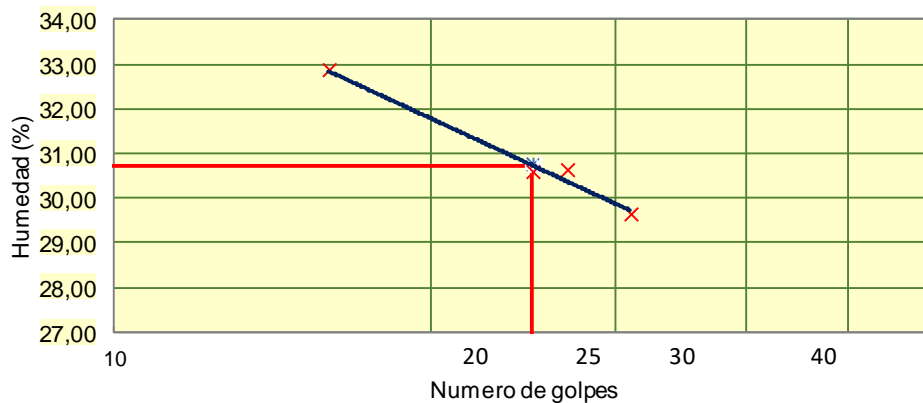
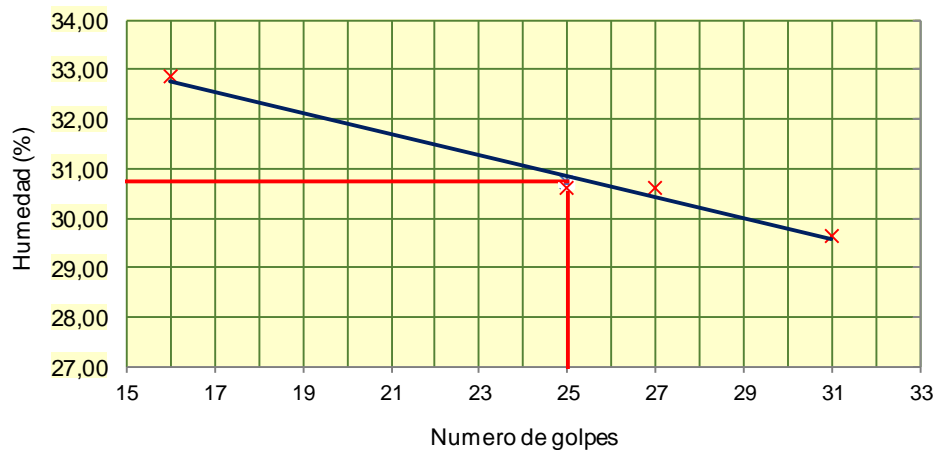
ANEXO C – RESULTADOS COMPLEMENTARES ENSAYO DE ATTERBERG

limitez de Atterberg

Limite Líquido (LL)							
Cápsula	nº	g	-	C6	C11	C14	C16
Solo úmido + cápsula	kg/m³	h	-	13,10	15,10	12,81	13,56
Solo seco + cápsula	g	i	-	11,56	13,39	11,50	12,07
Peso da cápsula	g	j	-	6,87	7,80	7,08	7,20
Água	g	k	h - i	1,54	1,71	1,31	1,49
Solo seco	g	l	i - j	4,69	5,59	4,42	4,87
Umidade	%	m	k / l	32,84	30,59	29,64	30,60
Numero de golpes	%	n		16	25	31	27

Limite Plático (LP)			
C1	C2	C3	C4
8,67	8,24	8,06	8,54
8,44	7,99	7,81	8,30
7,34	6,87	6,69	7,00
0,23	0,25	0,25	0,24
1,10	1,12	1,12	1,30
20,91	22,32	22,32	18,46
Nº de Pontos Aproveitados			

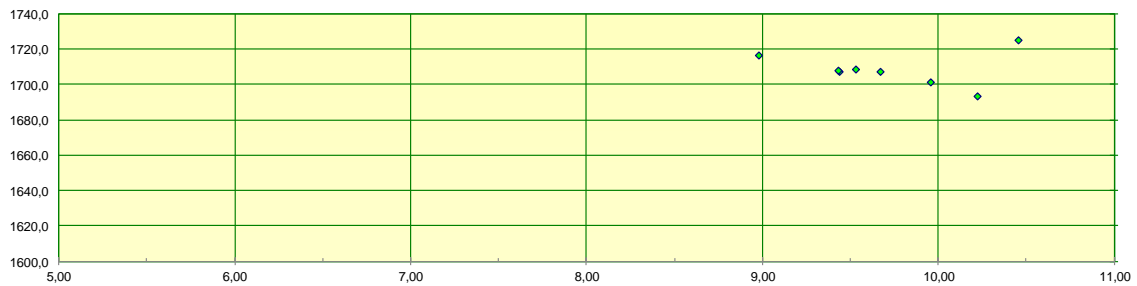
RESULTADOS	
LL	30,73
LP	21,00
IP	9,73
MATERIAL	Argiloso



ANEXO D – RESULTADOS COMPLEMENTARES ENSAYO DE EXPANSION LIBRE

DESCRIÇÃO				ENSAYOS DE EXPANSIÓN LIBRE							
				0% RRM		5% RRM		10% RRM		15% RRM	
				Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº
				D1	D4	D1	D6	D2	D4	D2	D3
Solo úmido + molde	g	a	-	46,18	45,22	46,16	44,13	45,39	44,52	45,43	46,79
Peso do molde	g	b	-	9,78	9,58	9,78	8,35	9,74	9,56	9,74	9,97
Solo úmido	g	c	a - b	36,40	35,64	36,38	35,78	35,65	34,96	35,69	36,82
Volume do molde	dm ³	d	-	0,01944	0,01871	0,01944	0,01913	0,01908	0,01871	0,01908	0,01973
Dens. do solo úmido	kg/m ³	e	c / d	1872,18	1904,76	1871,15	1870,08	1868,28	1868,42	1870,38	1866,12
Dens. do solo seco	kg/m ³	f	e/(1+m)	1707,09	1724,42	1708,28	1716,00	1707,10	1707,35	1700,95	1693,02
Cápsula	nº	g	-	C11	C12	C11	C3	C15	C9	C10	C12
Solo úmido + cápsula	kg/m ³	h	-	19,14	17,08	22,62	15,55	18,11	18,01	21,45	15,55
Solo seco + cápsula	g	i	-	18,14	16,19	21,33	14,82	17,18	17,06	20,19	14,82
Peso da cápsula	g	j	-	7,80	7,68	7,80	6,69	7,33	6,99	7,54	7,68
Água	g	k	h - i	1,00	0,89	1,29	0,73	0,93	0,95	1,26	0,73
Solo seco	g	l	i - j	10,34	8,51	13,53	8,13	9,85	10,07	12,65	7,14
Umidade	%	m	k / l	9,67	10,46	9,53	8,98	9,44	9,43	9,96	10,22
Índice de vacíos			e	0,58	0,57	0,58	0,57	0,58	0,58	0,59	0,60
Grado de Saturación			S	44,87	49,89	44,32	42,26	43,81	43,79	45,76	46,39

SATURACION INICIAL DAS AMOSTRAS

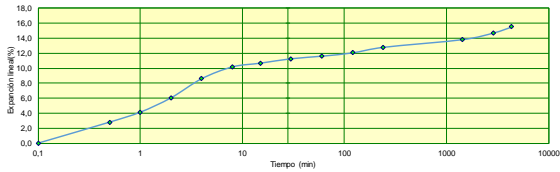


		0% RRM						5% RRM						10% RRM						15% RRM					
		D1			D4			D1			D6			D2			D4			D2			D3		
		Altura	20,365		Altura	19,74		Altura	20,365		Altura	20,22		Altura	20,195		Altura	19,74		Altura	20,195		Altura	20,78	
(min)	tempo	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.	Leitura	Difer.	Exp.
0,1	0,1	14,00	0,00	0,0	8,00	0,00	0,0	6,56	0,00	0,0	9,90	0,00	0,0	9,54	0,00	0,0	7,50	0,00	0,0	11,50	0,00	0,0	11,50	0,00	0,0
0,5	0,5	14,57	0,57	2,8	8,78	0,78	4,0	6,95	0,39	1,9	7,25	0,50	2,5	10,30	0,40	2,0	9,95	0,41	2,1	7,80	0,30	1,5	11,90	0,40	2,0
1	1	14,84	0,84	4,1	9,27	1,27	6,4	7,20	0,64	3,1	7,43	0,68	3,4	10,55	0,65	3,2	10,40	0,86	4,4	7,90	0,40	2,0	12,05	0,55	2,7
2	2	15,23	1,23	6,0	9,84	1,84	9,3	7,72	1,16	5,7	7,83	1,08	5,3	10,80	0,90	4,5	10,80	1,26	6,4	8,12	0,62	3,1	12,25	0,75	3,7
4	4	15,75	1,75	8,6	10,05	2,05	10,4	8,15	1,59	7,8	8,30	1,55	7,7	11,15	1,25	6,2	11,01	1,47	7,4	8,32	0,82	4,1	12,50	1,00	5,0
8	8	16,07	2,07	10,2	10,19	2,19	11,1	8,36	1,80	8,8	8,51	1,76	8,7	11,48	1,58	7,8	11,21	1,67	8,5	8,52	1,02	5,1	12,80	1,30	6,4
15	15	16,17	2,17	10,7	10,26	2,26	11,4	8,50	1,94	9,5	8,63	1,88	9,3	11,68	1,78	8,8	11,35	1,81	9,2	8,56	1,06	5,2	12,89	1,39	6,9
30	30	16,29	2,29	11,2	10,32	2,32	11,8	8,56	2,00	9,8	8,83	2,08	10,3	11,84	1,94	9,6	11,45	1,91	9,7	8,62	1,12	5,5	12,94	1,44	7,1
60	1	16,36	2,36	11,6	10,38	2,39	12,1	8,72	2,16	10,6	8,94	2,19	10,8	11,87	1,97	9,8	11,57	1,97	10,0	8,68	1,18	5,8	12,99	1,49	7,4
120	2	16,45	2,45	12,0	10,52	2,52	12,6	8,81	2,25	11,0	9,01	2,26	11,2	11,89	1,99	9,9	11,64	2,10	10,6	8,70	1,20	5,9	13,07	1,57	7,8
240	4	16,60	2,60	12,8	10,62	2,62	13,3	8,86	2,30	11,3	9,07	2,32	11,5	11,93	2,03	10,1	11,72	2,18	11,0	8,76	1,25	6,2	13,14	1,64	8,1
1440	1	16,81	2,81	13,8	10,80	2,80	14,2	9,06	2,50	12,3	9,29	2,54	12,6	11,97	2,07	10,3	11,83	2,29	11,6	8,84	1,44	7,1	13,26	1,76	8,7
2880	2	16,99	2,99	14,7	10,93	2,93	14,6	9,11	2,55	12,5	9,34	2,59	12,8	12,03	2,13	10,5	11,85	2,31	11,7	9,07	1,57	7,8	13,37	1,87	9,3
4320	3	17,15	3,15	15,5	10,97	2,97	15,0	9,15	2,59	12,7	9,38	2,63	13,0	12,08	2,18	10,8	11,86	2,32	11,8	9,14	1,64	8,1	13,40	1,90	9,4
5760	4	17,20	3,20	15,7	11,06	3,06	15,5	9,17	2,61	12,8	9,39	2,64	13,1	12,17	2,27	11,2	11,88	2,34	11,9	9,18	1,68	8,3	13,42	1,92	9,5
7200	5	17,20	3,20	15,7	11,11	3,11	15,8	9,18	2,62	12,9	9,40	2,65	13,1	12,21	2,31	11,4	11,88	2,34	11,9	9,19	1,69	8,4	13,43	1,93	9,6
0				15,7		15,8		12,9			13,1			11,4			11,9			8,4			9,6		

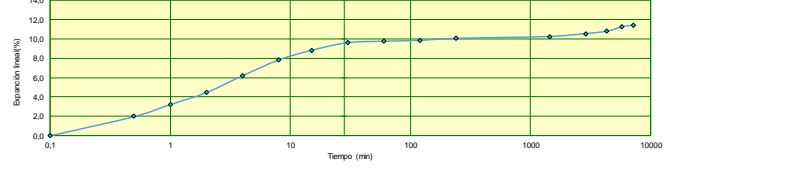
	0% RRM	5% RRM		
Humidade	6,37254902	10,0702576	6,37254902	9,56663941
expansão	15,7132335	15,7548126	12,8652999	13,1058358
saturação	44,8709663	49,8857146	44,3203346	42,2564435
	D1	D4	D1	D6
	15,71	15,75	9,56	9,40
	12,4723791	12,1073961	7,58	7,84

	10% RRM	15% RRM		
Humidade	7,14285714	10,0702576	7,14285714	9,56663941
expansão	11,4384749	11,8541033	8,36840802	9,556821
saturação	43,8071778	43,7888289	45,7649027	46,3889365
	D2	D4	D2	D3
	12,21	12,81	9,18	13,46
	11,8	11,36	8,12	13,44

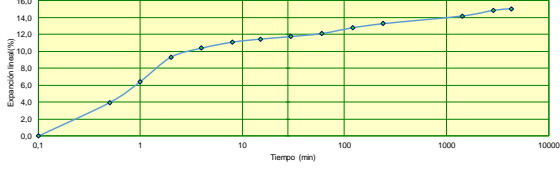
D1



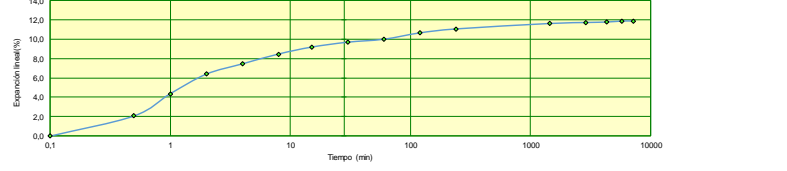
D5



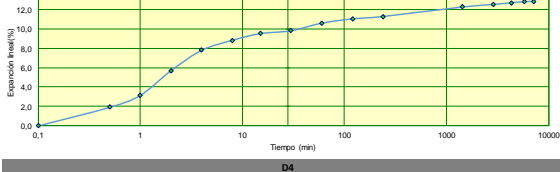
D2



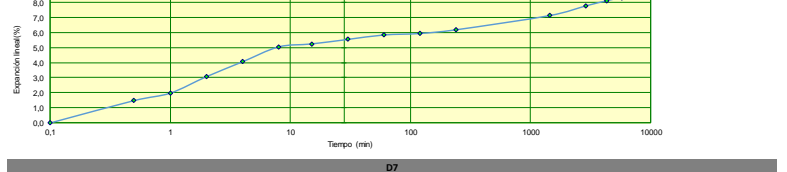
D6



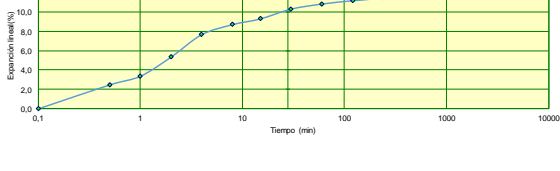
D3



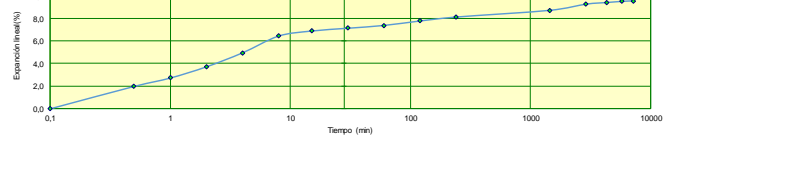
D7



D4



D7



PROCESAMIENTO DE DATOS POST ENSAYO

DESCRIPÇÃO				Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº	Molde Nº
				D1	D4	D1	D6	D2	D4	D2	D3
Cápsula	nº	g	-	C1	C10	C3	C5	C8	C10	C2	C4
Solo úmido + cápsula	kg/m³	h	-	19,75	18,61	19,79	18,38	21,02	18,61	19,66	17,12
Solo seco + cápsula	g	i	-	16,91	16,08	16,91	16,07	17,87	16,28	17,01	14,98
Peso da cápsula	g	j	-	7,34	7,54	6,69	7,76	6,09	7,54	6,87	7,00
Água	g	k	h - i	2,84	2,53	2,88	2,31	3,15	2,33	2,65	2,14
Solo seco	g	l	i - j	9,57	8,54	10,22	8,31	11,78	8,74	10,14	7,98
Umidade	%	m	k / l	29,68	29,63	28,18	27,80	26,74	26,66	26,13	26,82
Indice de vacios			e	0,83	0,81	0,78	0,78	0,76	0,77	0,72	0,75
Grado de Saturación			s	96,48	98,42	97,03	96,23	94,64	93,58	97,94	96,87

SATURACIÓN FINAL

RESUMEN HUMEDAD											
humedad inicial	%		w0	9,67	10,46	9,53	8,98	9,44	9,43	9,96	10,22
humedad final	%		wf	29,68	29,63	28,18	27,80	26,74	26,66	26,13	26,82
w0 - wf	%			20,00	19,17	18,65	18,82	17,30	17,23	16,17	16,59
RESUMEN SATURACIÓN											
saturacion inicial	%		S0	44,87	49,89	44,32	42,26	43,81	43,79	45,76	46,39
saturacion final	%		Sf	96,48	98,42	97,03	96,23	94,64	93,58	97,94	96,87
S0 - Sf	%			51,61	48,53	52,71	53,97	50,84	49,79	52,17	50,48
SATURACION FINAL DAS AMOSTRAS											
expansión	%		%	15,71	15,75	12,87	13,11	11,44	11,85	8,37	9,56
Dens. do solo seco inicial	kg/m³	b	-	1707,09	1724,42	1708,28	1716,00	1707,10	1707,35	1700,95	1693,02
Dens. do solo seco final	kg/m³	c	a - b	1.475,27	1.489,72	1.513,56	1.517,16	1.531,88	1.526,41	1.569,60	1.545,34

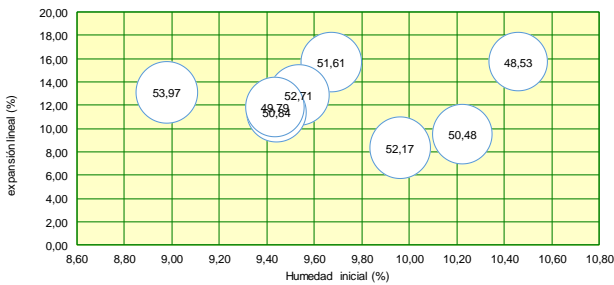
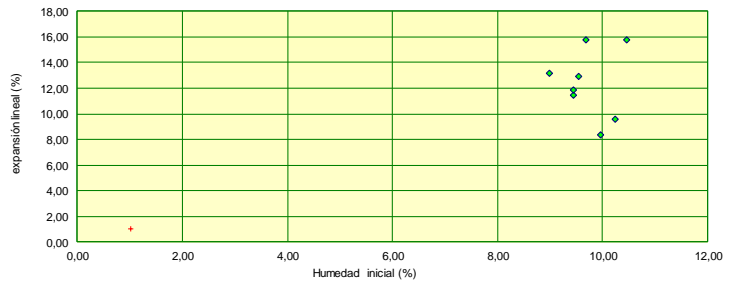
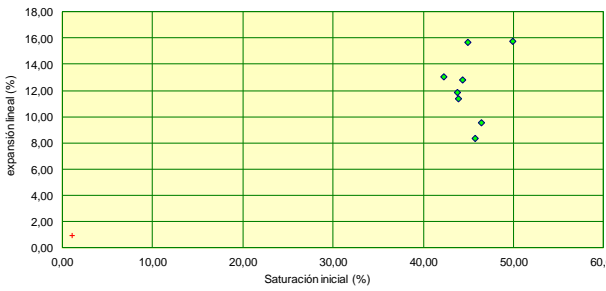


GRAFICO: correlaciona la expansión lineal de la muestra considerando la humedad inicial y la variación de la saturación

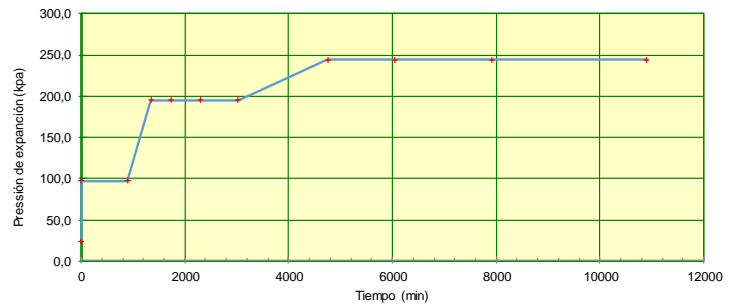
ANEXO E – RESULTADOS COMPLEMENTARES DEL ENSAYO DE EXPANSION CONFINADA

ENSAYO DE EXPANSION CONFINADA

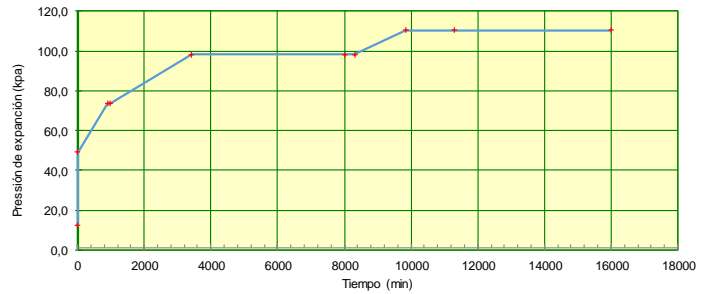
DESCRIÇÃO				Molde Nº	Molde Nº
				ANEL	ANEL2
Solo úmido + molde	g	a	-	183,54	462,87
Peso do molde	g	b	-	108,51	309,09
Solo úmido	g	c	a - b	75,03	153,78
Volume do molde	dm ³	d	-	0,04018	0,08007
Dens. do solo úmido	kg/m ³	e	c / d	1867,41	1920,60
Dens. do solo seco	kg/m ³	f	e/(1+m)	1709,23	1734,42
Cápsula	nº	g	-	C5	C2
Solo úmido + cápsula	kg/m ³	h	-	19,33	173,78
Solo seco + cápsula	g	i	-	18,35	157,60
Peso da cápsula	g	j	-	7,76	6,87
Água	g	k	h - i	0,98	16,18
Solo seco	g	l	i - j	10,59	150,73
Umidade	%	m	k / l	9,25	10,73
Indice de vacios			e	0,58	0,56
Grado de Saturación			S	43,08	52,03

ENSAYO DE EXPANSION CONFINADA

tempo (min)	ANEL			
	Altura (mm)	20,02	Area (cm ²)	20,0692989
	Dial (mm)	Carga final (Kg)	Exp. Kg/cm ²	Kpa
0	0,000	0,50	0,249	24,432
6	0,152	2,00	0,997	97,728
900	0,121	2,00	0,997	97,728
1345	0,125	4,00	1,993	195,456
1728	0,098	4,00	1,993	195,456
2304	0,118	4,00	1,993	195,456
3024	0,121	4,00	1,993	195,456
4752	0,123	5,00	2,491	244,320
6048	0,127	5,00	2,491	244,320
7920	0,127	5,00	2,491	244,320
10900	0,127	5,00	2,491	244,320
			2,5	244,3



ANEL2				
tempo	Dial	Carga final	Exp.	
(min)	(mm)	(Kg)	Kg/cm2	Kpa
0	0,000	0,50	0,125	12,260
6	0,123	2,00	0,500	49,040
902	0,040	3,00	0,750	73,560
963	0,035	3,00	0,750	73,560
3430	0,010	4,00	1,000	98,080
8005	0,092	4,00	1,000	98,080
8310	0,020	4,00	1,000	98,080
9835	0,031	4,50	1,125	110,340
11299	-0,010	4,50	1,125	110,340
15992	0,011	4,50	1,125	110,340
18619	0,011	4,50	1,125	110,340
			1,1	110,3



PROCESAMIENTO DE DATOS POST ENSAYO

DESCRIPCIÓN	Molde N°	Molde N°
	ANEL	ANEL2

Cápsula	n°	g	-	C9	C10
Solo úmido + cápsula	kg/m³	h	-	28,71	32,82
Solo seco + cápsula	g	i	-	24,92	28,58
Peso da cápsula	g	j	-	6,99	7,54
Água	g	k	h - i	3,79	4,24
Solo seco	g	l	i - j	17,93	21,04
Umidade	%	m	k / l	21,14	20,15
Indice de vacios			e	0,58	0,56
Grado de Saturación			S	98,41	97,68

RESUMEN HUMEDAD					
humedad inicial	%		w0	9,25	10,73
humedad final	%		wf	21,14	20,15
w0 - wf	%			11,88	9,42
RESUMEN SATURACIÓN					
saturacion inicial	%		S0	43,08	52,03
saturacion final	%		Sf	98,41	97,68
S0 - Sf	%			55,33	45,65
SATURACION FINAL DAS AMOSTRAS					
Pressión de expansión	Kpa			244,32	110,34
Dens. do solo seco inicial	kg/m³			1709,23	1734,42
Dens. do solo seco final	kg/m³			1.709,23	1.734,42