DESDE 2013
https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/issue/archive
Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI
ISSN: 2007-6363

Publicación Semestral Pädi Vol. 14 No. Especial 3 (2026) 418-427

Evaluación de Residuos de Construcción y Demolición para modificar la plasticidad en suelos finos
Evaluation of Construction and Demolition Waste to Modify Plasticity in Fine Soils

M. Bernal-Hernández[a], L. D. López-León[a,*], V. Volpi-León[a], I. E. Castañeda-Robles[a]

[a] *Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.*

Resumen

El desarrollo urbano ha provocado una acumulación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). A su vez, los suelos finos son un riesgo para la estabilidad de las infraestructuras; por ello, se plantea modificarlos con RCD, ya que estos residuos carecen de plasticidad. Esta investigación evaluó la incorporación de RCD para modificar la plasticidad de suelos finos. Se estudió una arcilla de Mineral de la Reforma, integrando concreto y cerámica triturados (75 µm). Se analizaron siete dosificaciones, individuales e híbridas al 20% y 30%, bajo la norma ASTM D-4318. Las sustituciones individuales fueron óptimas; la muestra con 30% de residuo de concreto redujo el Índice de Plasticidad (IP) en un 14.45%, lo que disminuyó su susceptibilidad a la humedad. No obstante, las mezclas híbridas fueron perjudiciales; el caso más crítico fue la sustitución del 30% al aumentar la plasticidad en un 20.40%, lo cual generó inestabilidad. La incorporación de RCD en suelos finos representa una alternativa técnica viable para mejorar sus propiedades en futuros proyectos de infraestructura.

Palabras Clave: Residuos de Construcción y Demolición, Índice de Plasticidad, suelos finos.

Abstract

Urban development has led to an accumulation of Construction and Demolition Waste (CDW). In turn, fine-grained soils pose a risk to the stability of infrastructures; therefore, modifying them with CDW is proposed, since these wastes lack plasticity. This research evaluated the incorporation of CDW to modify the plasticity of fine-grained soils. A clay from Mineral de la Reforma was studied, integrating crushed concrete and ceramics (75 µm). Seven dosages, both individual and hybrid at 20% and 30%, were analyzed under the ASTM D-4318 standard. The individual substitutions were optimal; the sample with 30% concrete waste reduced the Plasticity Index (PI) by 14.45%, which decreased its moisture susceptibility. Nonetheless, the hybrid mixtures were detrimental; the most critical case was the 30% substitution, as it increased plasticity by 20.40%, generating instability. The incorporation of CDW in fine-grained soils represents a viable technical alternative to improve their properties in future infrastructure projects.

Keywords: construction and demolition waste, plasticity index, fine soils.

1. Introducción

En la actualidad, la industria de la construcción se enfrenta a una problemática ambiental ocasionada por la generación excesiva de Residuos de Construcción y Demolición (RCD). En el ámbito internacional, esta acumulación ha sido provocada por el desarrollo urbano acelerado en diversas regiones, principalmente en Asia y América Latina, además de la generación repentina de escombros tras fenómenos naturales (Lauritzen, 2019). Ante estos acontecimientos y la saturación de los vertederos para la disposición de los RCD, se ha señalado la importancia de investigar alternativas de aplicación para este volumen acumulado (Robayo et al., 2015).

Esto ha fomentado el uso de desechos en aplicaciones enfocadas en la edificación, desde la elaboración de morteros y concretos sostenibles hasta el desarrollo de aglomerantes sustentables y sustitutos parciales para la fabricación de cemento. Asimismo, destaca la producción de diversos elementos prefabricados para uso en mampostería y materiales

*Autor para la correspondencia: luis_lopez@uaeh.edu.mx
Correo electrónico: be453923@uaeh.edu.mx (Manuel Bernal-Hernndez), luis_lopez@uaeh.edu.mx (Luis Daimir López-León), volpi@uaeh.edu.mx (Valeria Volpi-León), ivan_castaneda@uaeh.edu.mx (Ivan Erick Castañeda-Robles).

Historial del manuscrito: recibido el 11/06/2026, última versión-revisada recibida el 13/08/2026, aceptado el 11/092026, publicado el 06/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.29057/icbi.v14iEspecial3.18141

CC BY NC ND

de soporte para obras de drenaje urbano, lo cual promueve estrategias de economía circular en el sector de la construcción (Sangiorgi et al., 2015; Julca Lozano et al., 2025). Posteriormente, surgió la necesidad de evaluar las aplicaciones de los RCD en terracerías y suelos, buscando atender la inestabilidad de los suelos finos de alta plasticidad; esta condición vuelve al suelo inestable frente a variaciones de humedad, provocando deformaciones volumétricas que comprometen la integridad de las infraestructuras (Cely y Méndez, 2019). Las primeras aproximaciones consistieron en aprovechar el escombro como material de relleno inerte, empleando una metodología propuesta de forma empírica (Castaño et al., 2013). Además, se utilizó para acondicionar caminos de acceso temporal mediante la elaboración de plataformas provisionales de baja vida útil, o en tareas de protección y estabilización de taludes (Carrascal Caldera y Martelo Oclassen, 2020). No obstante, dichas prácticas se realizaron sin contemplar una mezcla uniforme de los agregados que optimizara las propiedades del suelo (Bellera Campodarve, 2019).

En este punto, se identifica una carencia de fundamentos técnicos sobre el comportamiento de las partículas finas del residuo al integrarse de forma homogénea al suelo. Esto se debe a que los métodos tradicionales se han centrado en el aprovechamiento de agregados gruesos, lo cual conlleva el descarte de las fracciones finas al ser consideradas material sin valor estructural (López Julián et al., 2017). Por tanto, es indispensable replantear el valor técnico del RCD triturado para dar solución a suelos que carecen de las propiedades óptimas para resistir cargas, lo cual compromete la integridad de las obras debido a sus considerables cambios volumétricos por expansión y contracción (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1992).

Aunque se ha analizado el uso de escombros en terracerías y subbases, es notable la ausencia de estudios enfocados en la consistencia y la interacción de las partículas finas de los residuos con la estructura interna del suelo (Amorim et al., 2023; Huamani-Arango et al., 2025). La modificación de la plasticidad mediante escombro triturado carece de investigación experimental precisa que valide su eficacia a través de ensayos normalizados, que proponga métodos rigurosos para el procesamiento de los materiales y que establezca una metodología para determinar las dosificaciones óptimas (Aguilar Sulca, 2023; Julca Lozano et al., 2025).

La presente investigación surge con el objetivo de evaluar el comportamiento de los RCD finamente triturados (concreto y cerámica) en la modificación de las propiedades de consistencia y plasticidad de suelos finos, con el fin de determinar las dosificaciones óptimas y su efectividad como agentes modificadores. El estudio se fundamenta en la hipótesis de que la incorporación de estas partículas rígidas y no plásticas reduce el Índice de Plasticidad (IP), mejorando los límites de consistencia y plasticidad del suelo base.

Con este propósito, la investigación se estructura en cinco capítulos que permiten su desarrollo de manera lógica y secuencial. El primer capítulo contempla la introducción. El segundo capítulo detalla la metodología, la cual abarcó la extracción y acondicionamiento del suelo base, el procesamiento de los RCD y el diseño de siete dosificaciones, las cuales fueron evaluadas experimentalmente (ASTM International, 2018a). En el tercer capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de plasticidad al integrar los RCD en sus distintas proporciones. El cuarto capítulo expone la discusión, evaluando el desempeño de cada mezcla para identificar la dosificación óptima y analizando las causas técnicas que fundamentan el comportamiento de las muestras. Finalmente, el quinto capítulo ofrece las conclusiones generales, contrastando la eficacia técnica de cada residuo y su viabilidad de aplicación, demostrando así que estos materiales pueden transformarse en un recurso estratégico y sustentable para el desarrollo urbano (Pacheco Bustos et al., 2020).

2. Metodología

En esta sección se detallan los materiales y métodos para evaluar la viabilidad técnica de utilizar RCD de concreto y cerámico como agentes modificadores en suelos finos. La investigación fue de tipo experimental, con un enfoque cuantitativo y alcance descriptivo, lo que permitió obtener resultados confiables y comparables entre las diferentes dosificaciones evaluadas.

2.1. Suelo fino

Consiste en un suelo fino cohesivo, clasificado dentro de la categoría de las arcillas (ASTM International, 2017). Este tipo de suelo se utiliza para construir núcleos impermeables en presas, conformar barreras de contención en rellenos sanitarios y fabricar materiales prefabricados para uso de mampostería. El sustrato fue extraído de un punto de muestreo localizado en el municipio de Mineral de la Reforma, Hidalgo. La elección de este material se fundamenta en su deformabilidad y susceptibilidad a los cambios de humedad; condiciones que lo convierten en la muestra ideal para evaluar su modificación (Juárez Badillo, 2005).

2.2. Residuo de concreto

Es un material derivado del concreto hidráulico, el cual está compuesto por agregados pétreos integrados de forma homogénea en un elemento sólido. Este material posee una alta rigidez estructural y destaca por su propiedad no plástica; al presentar una cohesión prácticamente nula, es un elemento que mantiene estabilidad volumétrica frente a los cambios de humedad (Amorim et al., 2023; Huamani-Arango et al., 2025). El material fue recolectado a partir de cilindros de concreto provenientes de prácticas experimentales desarrolladas en el laboratorio de materiales. Su selección se justifica debido a que son muestras que estuvieron sujetas a un diseño de mezcla y a un proceso de curado.

2.3. Residuo cerámico

Este residuo es de origen arcilloso y adquiere una estructura sólida tras ser sometido a tratamientos térmicos. Su elección se fundamentó en su proceso de fabricación, ya que la cocción a altas temperaturas elimina por completo sus propiedades plásticas. Además, su estructura porosa le otorga una alta capacidad de absorción de humedad, rugosidad superficial y

dureza a las partículas (Julca Lozano et al., 2025). Se recolectó a partir de elementos de desecho en los laboratorios de materiales.

2.4. Diseño de mezclas

El diseño experimental se desarrolló bajo un modelo de sustitución (Tabla 2.4.1), necesario para evaluar el impacto de los RCD al integrarse al suelo. Se planteó una muestra de suelo base como referencia de control para el análisis y un total de siete dosificaciones experimentales, manteniendo una masa constante de 2.5 kg por muestra. La selección de los porcentajes de sustitución del 20% y 30%, tanto en aplicaciones individuales como en mezclas híbridas, responde a un criterio de optimización técnica destinado a reducir el Índice de Plasticidad (Chirinos et al., 2021).

Tabla 2.4.1 Dosificación de muestras para la fase experimental

Muestra	Suelo (kg)	Residuo cerámico (kg)	Residuo de concreto (kg)
1	2.5	0	0
2	2	0.5	0
3	1.75	0.75	0
4	2	0	0.5
5	1.75	0	0.75
6	2	0.25	0.25
7	1.75	0.375	0.375

2.5. Extracción y acondicionamiento del suelo base

La extracción del material se realizó conforme a la norma ASTM D-420, la cual establece los criterios necesarios para la exploración y muestreo a fin de asegurar que el suelo obtenido sea representativo del estrato analizado sin alterar sus propiedades (ASTM International, 2018a). Se empleó un método de excavación a cielo abierto con herramienta manual en un área de 0.60 x 0.60 m hasta una profundidad de 1.00 m. El volumen total recolectado de 15 kg fue depositado en recipientes herméticos, como medida preventiva para mitigar la alteración de sus propiedades por agentes ambientales externos.



Figura 2.5.1 Extracción del suelo base

El acondicionamiento físico de la muestra inició con una fase de secado, cuyo propósito fue eliminar la humedad natural del suelo. Este paso resulta indispensable para asegurar que el proceso de dosificación y mezclado se realice con materiales completamente secos para facilitar su trabajabilidad, y reducir errores provocados por variaciones de humedad.

La muestra de suelo fue sometida a un proceso de disgregado manual de los terrones arcillosos. Este procedimiento resultó fundamental para llevar a cabo el cribado preliminar a través de la malla No. 200, ya que la normativa ASTM D-4318 restringe el análisis exclusivamente a la fracción fina del material. Finalmente, la muestra de suelo procesada fue almacenada de forma hermética, asegurando sus características físicas.

2.6. Clasificación de suelos

La caracterización del suelo tuvo como propósito determinar sus propiedades antes de integrar los agentes modificadores. La clasificación del material se realizó conforme a los lineamientos de la norma ASTM D-2487, aplicando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM International, 2017). La metodología se centró en la determinación de los límites de consistencia y plasticidad normados por la ASTM D-4318, utilizando estos resultados como el criterio principal para clasificar el sustrato (ASTM International, 2018b).

2.7. Obtención y procesamiento de agentes modificadores

La obtención de los materiales se realizó mediante una recolección selectiva para asegurar propiedades similares. Con el propósito de lograr mezclas uniformes al integrarse con el suelo fino, los RCD fueron sometidos a trituración mecánica en la Máquina de Desgaste de Los Ángeles (MATEST, modelo A075N). El equipo operó bajo una configuración de 500 ciclos, aplicando una carga abrasiva con esferas de acero de 1.5 pulgadas. Este procedimiento de molienda permitió que los materiales redujeran su tamaño de partícula al nivel óptimo (Lauritzen, 1993).

Posteriormente, el material triturado se sometió a un proceso de cribado utilizando un juego de tamices estándar compuesto por las mallas No. 4, No. 10, No. 40 y No. 200. Únicamente se seleccionó la cantidad que alcanzó el tamaño de 75 µm, dimensión necesaria para lograr una buena interacción entre las partículas de los diferentes materiales (López Julián et al., 2017). Este procedimiento se repitió hasta obtener una masa neta de 2.0 kg por cada residuo, cantidad calculada para garantizar el desarrollo de las pruebas contemplando un margen de error.



Figura 2.7.1 Procesamiento de agentes modificadores

Los agentes modificadores fueron sometidos a un proceso de secado empleando equipo de laboratorio. Este procedimiento fue vital para reducir el contenido de humedad, garantizando exactitud en las dosificaciones y mejorando la trabajabilidad de las partículas finas (ASTM International, 2018b). Al final, los materiales procesados se almacenaron en recipientes con sellado hermético, una práctica indispensable para preservar sus propiedades físicas hasta el momento de su integración con el suelo base.

2.8. Dosificación y resguardo de las mezclas

Las proporciones de los materiales se obtuvieron mediante el uso de balanzas de precisión, garantizando que la cantidad de suelo base y agentes modificadores correspondiera al diseño experimental (ver Tabla 2.4.1). Después, los componentes se sometieron a un proceso de mezclado en seco, para lograr una distribución homogénea de los materiales (Hidalgo Montoya y Castrillón Rodríguez, 2022). Finalmente, las muestras se resguardaron con la finalidad de conservar sus características físicas.



Figura 2.8.1 Homogeneización de las muestras

2.9. Ejecución de ensayos y cálculo de parámetros de consistencia y plasticidad

La determinación de los límites de consistencia y plasticidad de las muestras se realizó bajo los lineamientos de la norma ASTM D-4318 (ASTM International, 2018b). Este procedimiento permite identificar con precisión las propiedades de cada mezcla, las cuales ayudan a comprender su respuesta ante la variación del contenido de humedad en sus distintas dosificaciones.

El Límite Líquido (LL) se obtuvo determinando la humedad requerida para lograr el cierre de la ranura tras aplicar 25 golpes en la copa de Casagrande. Por su parte, el Límite Plástico (LP) se definió por medio del contenido de humedad con el cual los cilindros de las muestras comenzaron a agrietarse al alcanzar un diámetro de 3 mm.



Figura 2.9.1 Ensayos de consistencia y plasticidad de las muestras modificadas

A partir de estos ensayos se calculó el Índice de Plasticidad de cada dosificación, con el objetivo de evaluar si la incorporación de los agentes modificadores lograba una reducción de este parámetro en comparación con los valores presentados por el suelo base. El procesamiento de los datos recopilados, así como la ejecución de los cálculos y la generación de los gráficos correspondientes, se llevó a cabo mediante el software Microsoft Excel.

3. Resultados

En este capítulo se exponen en tablas y gráficos los datos recopilados durante los ensayos de laboratorio bajo la normativa ASTM D-4318. Para facilitar su análisis y comprensión, los resultados se dividieron en dos etapas; en primer lugar, se mostró la caracterización de los materiales base tras su procesamiento; posteriormente, se hizo un análisis comparativo del Límite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de las siete dosificaciones evaluadas, lo cual permitió evidenciar la respuesta del sustrato ante la incorporación de los agentes modificadores.

3.1. Caracterización de los agregados

Antes de analizar las dosificaciones experimentales, fue indispensable establecer las propiedades físicas y de clasificación de los materiales en su estado individual. Por ello, en esta sección se presentó la caracterización del suelo base y de los agentes modificadores (residuos de concreto y cerámica) tras su procesamiento mecánico, exponiendo los datos en tablas.

- Suelo fino

El material seleccionado para el estudio se clasificó como una arcilla de baja plasticidad (CL), cuyo análisis se fundamenta en los criterios establecidos por la norma ASTM D-2487. El análisis reveló un suelo de color café grisáceo, caracterizado por una textura fina, con una presencia mínima de partículas gruesas y escasa materia orgánica. Su respuesta frente a la humedad exhibe alta cohesión, propiedad característica de materiales arcillosos (ver la Tabla 3.1.1).

Tabla 3.1.1 Caracterización del suelo base

Concepto	Descripción
Clasificación SUCS	CL
Textura	Fina y cohesiva
Apariencia visual	Café-grisáceo
Granulometría	75 µm

La posición del suelo en la Carta de Plasticidad de Casagrande confirma su comportamiento cohesivo al situarse por encima de la "Línea A" de acuerdo con la norma ASTM D-2487.

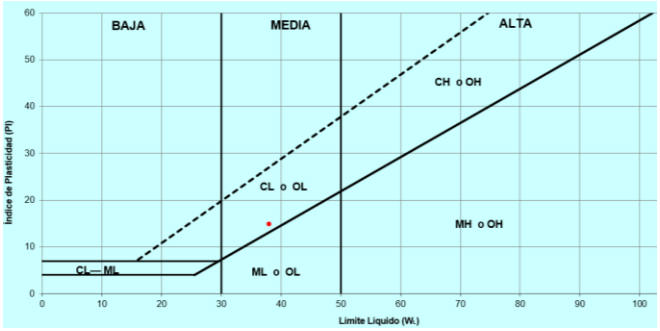


Figura 3.1.1 Carta de Plasticidad de Casagrande del suelo base

- Residuo de concreto

Tras el proceso de trituración por impacto y abrasión, así como el posterior tamizado de precisión, el residuo de concreto se presenta como un material fino de color gris claro, con una textura angular y rugosa. En la Tabla 3.1.2 se presentan los resultados del procesamiento de este agente modificador.

Tabla 3.1.2 Caracterización del residuo de concreto

Concepto	Descripción
Apariencia visual	Polvo fino, color gris claro
Textura	Rugosa y angular
Granulometría	75 m

- Residuo cerámico

Después de ser sometido al proceso de trituración y cribado estandarizado, se obtuvo un material fino de color terracota, el cual muestra una estructura de alta dureza y una superficie de baja absorción de humedad (ver Tabla 3.1.3).

Tabla 3.1.3 Caracterización del residuo cerámico

Concepto	Descripción
Apariencia visual	Polvo granular, color terracota
Textura	Lisa, angulosa
Granulometría	75 µm

3.2. Resultados comparativos de los límites de consistencia y plasticidad de las muestras

En este apartado se expusieron los resultados comparativos de los límites de consistencia y plasticidad de las siete dosificaciones analizadas. Los datos obtenidos en los ensayos se organizaron en tablas y gráficos. A partir de estos registros, se calcularon los valores finales del Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP) para cada espécimen, permitiendo observar la efectividad de las sustituciones.

- Muestra 1 de suelo base

Al analizar la muestra de suelo base, se encontró que, durante el ensayo de LL, el material mostró una cohesión uniforme, requiriendo un contenido de humedad del 38.10% para lograr el cierre de la ranura a los 25 golpes. En cuanto al LP, el suelo permitió formar cilindros de 3 mm de diámetro con una humedad del 23.18%, confirmando su capacidad de retener humedad en un estado plástico estable. A partir de estos parámetros, se calculó un IP de 14.92%, el cual servirá como el valor de referencia para evaluar la influencia de los agentes modificadores en los especímenes posteriores (ver tabla 3.2.3)

Tabla 3.2.1 Resultados del Límite Líquido

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)	Número de golpes
1	1.90	4.52	42.03	18
2	2.19	5.75	38.03	25
3	3.16	9.23	34.24	34

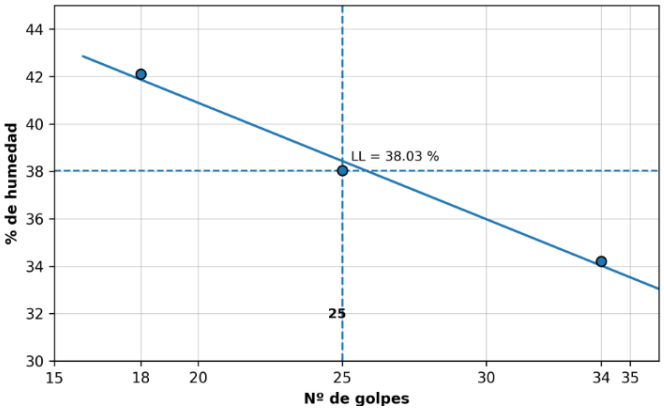


Figura 3.2.1 Diagrama de fluidez

Tabla 3.2.2 Resultados del Límite Plástico

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)
1	1.68	7.25	23.17
2	1.71	7.31	23.39
3	1.65	7.18	22.98

Tabla 3.2.3 Resultados de consistencia y plasticidad

Parámetro	Valor (%)
Promedio del Límite Líquido (LL)	38.10
Promedio del Límite Plástico (LP)	23.18
Índice de Plasticidad (IP)	14.92

- Muestra 2 con sustitución de residuo cerámico al 20%

Este espécimen exhibió una notable disminución en su susceptibilidad a la humedad. En la prueba de la Copa de

Casagrande, el material alcanzó la fluidez necesaria con un contenido de agua del 30.62%. Al determinar el LP, el cual registró un 29.00%, la mezcla conformó los cilindros presentando una textura granular más evidente, lo que refleja la pérdida de cohesión de la muestra. Como resultado, la dosificación registró un IP de 1.62% (como se muestra en la Tabla 3.2.6).

Tabla 3.2.4 Resultados del Límite Líquido

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)	Número de golpes
1	3.07	9.34	32.90	18
2	2.73	9.03	30.26	25
3	2.85	9.93	28.70	32

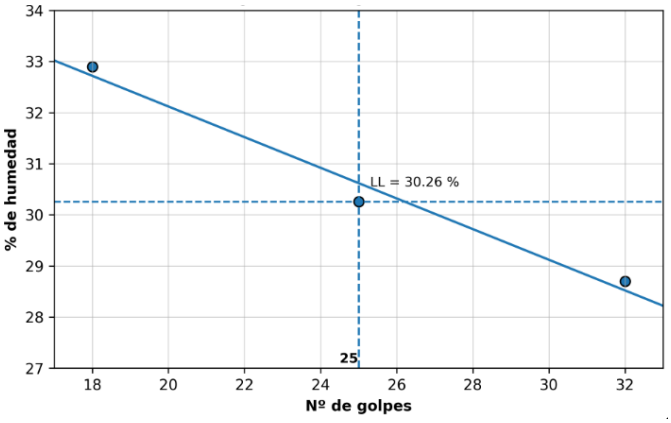


Figura 3.2.2 Diagrama de fluidez

Tabla 3.2.5 Resultados del Límite Plástico

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)
1	1.31	4.55	28.79
2	1.34	4.61	29.07
3	1.34	4.60	29.13

Tabla 3.2.6 Resultados de consistencia y plasticidad

Parámetro	Valor (%)
Promedio del Límite Líquido (LL)	30.62
Promedio del Límite Plástico (LP)	29.00
Índice de Plasticidad (IP)	1.62

- Muestra 3 con sustitución de residuo cerámico al 30%

Al analizar esta dosificación, se observó que el material retuvo aún menos humedad. El ensayo de LL arrojó un valor del 32.63%. En cuanto al LP, el cual registró un 25.78% de humedad, la mezcla resultó más difícil de moldear al formar los cilindros debido a la mayor cantidad de residuos cerámicos, los cuales no tienen propiedades plásticas. A partir de estos resultados, el IP se situó en un 6.85% (Tabla 3.2.9).

Tabla 3.2.7 Resultados del Límite Líquido

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)	Número de golpes
1	2.67	7.60	35.10	17
2	3.33	10.15	32.80	25
3	2.98	9.93	30.00	33

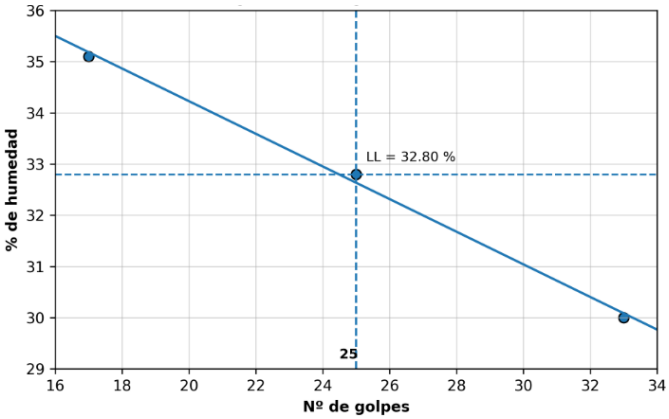


Figura 3.2.3 Diagrama de fluidez

Tabla 3.2.8 Resultados del Límite Plástico

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)
1	1.80	6.98	25.79
2	1.84	7.13	25.81
3	1.77	6.88	25.73

Tabla 3.2.9 Resultados de consistencia y plasticidad

Parámetro	Valor (%)
Promedio del Límite Líquido (LL)	32.63
Promedio del Límite Plástico (LP)	25.78
Índice de Plasticidad (IP)	6.85

- Muestra 4 con sustitución de residuo de concreto al 20%

La integración de este residuo provocó una alteración moderada en el comportamiento de la muestra ante la aplicación controlada de humedad. El ensayo determinó un LL del 33.49%. Respecto a la fase plástica, cuyo contenido de agua se situó en el 25.86%, al formar los cilindros se evidenció una textura ligeramente más rígida y menos cohesiva, producto de la fricción aportada por las partículas del concreto. Estos valores arrojaron un Índice de Plasticidad de 7.63%. La Tabla 3.2.12 presenta los parámetros de consistencia y plasticidad.

Tabla 3.2.10 Resultados del Límite Líquido

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)	Número de golpes
1	4.62	13.06	35.40	18
2	2.94	8.66	33.96	25
3	3.32	10.68	31.10	32

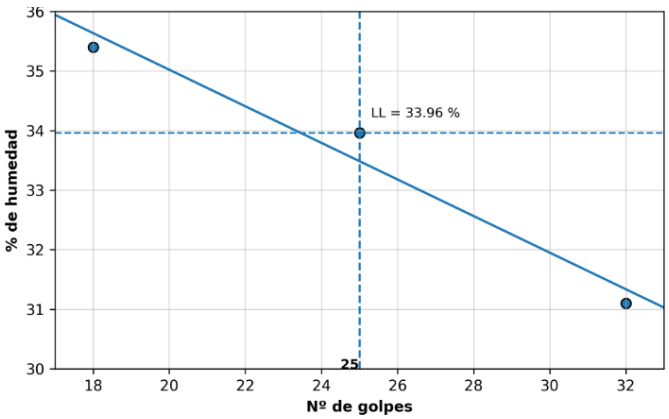


Figura 3.2.4 Diagrama de fluidez

Tabla 3.2.11 Resultados del Límite Plástico

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)
1	1.81	6.98	25.93
2	1.86	7.31	25.44
3	1.74	6.64	26.20

Tabla 3.2.12 Resultados de consistencia y plasticidad

Parámetro	Valor (%)
Promedio del Límite Líquido (LL)	33.49
Promedio del Límite Plástico (LP)	25.86
Índice de Plasticidad (IP)	7.63

- Muestra 5 con sustitución de residuo de concreto al 30%

Esta proporción determinó la dosificación más eficiente del diseño experimental en el comportamiento de sus límites de consistencia y plasticidad. El LL determinó un contenido de humedad del 31.90%. Por su parte, la conformación de los cilindros, que requirió un 31.43% de humedad, demostró ser una muestra prácticamente libre de cohesión, resultando en un IP casi nulo de 0.47%, confirmando la viabilidad de esta dosificación. En la Tabla 3.2.15 se resumen los valores obtenidos en los ensayos de consistencia y plasticidad.

Tabla 3.2.13 Resultados del Límite Líquido

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)	Número de golpes
1	3.78	10.87	34.80	17
2	3.44	10.85	31.70	25
3	2.32	7.93	29.20	34

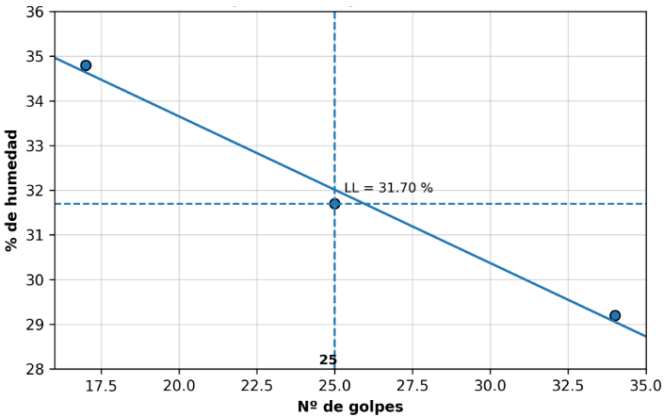


Figura 3.2.5 Diagrama de fluidez

Tabla 3.2.14 Resultados del Límite Plástico

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)
1	1.49	4.76	31.30
2	1.52	4.82	31.54
3	1.51	4.80	31.46

Tabla 3.2.15 Resultados de consistencia y plasticidad

Parámetro	Valor (%)
Promedio del Límite Líquido (LL)	31.90
Promedio del Límite Plástico (LP)	31.43
Índice de Plasticidad (IP)	0.47

- Muestra 6 con sustitución híbrida al 20%

La integración de la mezcla híbrida provocó un comportamiento adverso en sus límites de consistencia y plasticidad. Requirió de un 61.10% de humedad para alcanzar el LL. En la fase plástica, los cilindros mantuvieron buena trabajabilidad hasta tener humedad del 43.59%. Esto generó un incremento perjudicial en el IP, situándolo en un 17.51% (ver Tabla 3.2.18).

Tabla 3.2.16 Resultados del Límite Líquido

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)	Número de golpes
1	4.41	6.79	65.00	17
2	4.34	7.11	61.10	25
3	5.73	10.01	57.20	33

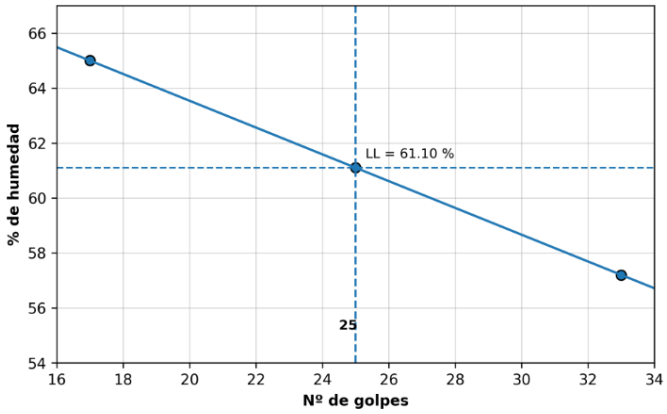


Figura 3.2.6 Diagrama de fluidez

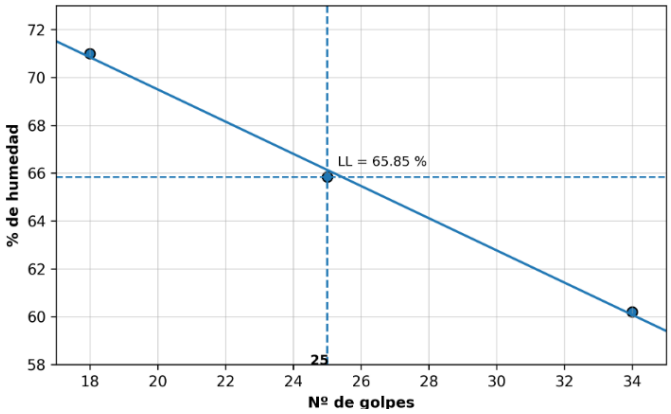


Figura 3.2.7 Diagrama de fluidez

Tabla 3.2.17 Resultados del Límite Plástico

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)
1	2.26	5.20	43.46
2	2.30	5.27	43.64
3	2.28	5.22	43.68

Tabla 3.2.18 Resultados de consistencia y plasticidad

Parámetro	Valor (%)
Promedio del Límite Líquido (LL)	61.1
Promedio del Límite Plástico (LP)	43.59
Índice de Plasticidad (IP)	17.51

- Muestra 7 con sustitución híbrida al 30%

Este último espécimen exhibió el efecto adverso más crítico del diseño experimental. El LL alcanzó un máximo de 65.68%. Asimismo, el LP se estableció en 30.36%, permitiendo la manipulación de los cilindros bajo condiciones de elevada retención de agua. Los cálculos arrojaron un IP del 35.32%, siendo esta la dosificación con el índice de plasticidad más elevado de todo el diseño experimental (como se muestra en la Tabla 3.2.21).

Tabla 3.2.19 Resultados del Límite Líquido

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)	Número de golpes
1	4.75	6.69	71.00	18
2	4.12	6.26	65.85	25
3	6.20	10.30	60.20	34

Tabla 3.2.20 Resultados del Límite Plástico

Prueba	Peso del agua (g)	Peso del suelo seco (g)	Contenido de humedad (%)
1	1.63	5.38	30.30
2	1.66	5.45	30.46
3	1.64	5.41	30.31

Tabla 3.2.21 Resultados de consistencia y plasticidad

Parámetro	Valor (%)
Promedio del Límite Líquido (LL)	65.68
Promedio del Límite Plástico (LP)	30.36
Índice de Plasticidad (IP)	35.32

4. Discusión

Al analizar los resultados, se tomó como referencia la muestra de suelo base, la cual presentó un IP de 14.92%, correspondiente a un suelo clasificado como CL de acuerdo con el SUCS. La incorporación de RCD modificó de manera importante los límites de consistencia del material, aunque el efecto dependió tanto del tipo de residuo como del porcentaje de sustitución empleado.

La disminución más significativa se obtuvo en la Muestra 5, la cual registró un IP de 0.47%, seguida por la Muestra 2, que obtuvo un IP de 1.62%. Asimismo, las Muestras 3 y 4 presentaron valores de 6.85% y 7.63%, respectivamente. Estos resultados comprueban que ambos agentes modificadores lograron disminuir de manera progresiva la plasticidad original del suelo en las diferentes dosificaciones contempladas en el diseño experimental. Este comportamiento se atribuye a que las partículas finas de los RCD actúan como materiales no plásticos que interrumpen parcialmente la estructura interna de la arcilla; esto disminuye la superficie activa responsable de la absorción de agua y favorece un incremento en la fricción entre partículas. Como consecuencia, la plasticidad del suelo disminuye, lo que reduce su susceptibilidad a los cambios de humedad (Amorim et al., 2023).

La disminución del IP representa una ventaja para aplicaciones donde se requiere limitar los cambios volumétricos asociados a ciclos de humedecimiento y secado, como ocurre en materiales destinados al mejoramiento de subrasantes y capas de apoyo de pavimentos. No obstante, la reducción del IP por sí sola no garantiza un mejor desempeño estructural, por lo que estos resultados deben complementarse con ensayos mecánicos, tales como el de Valor Soporte de California (CBR), expansión lineal, resistencia al corte y comportamiento bajo cargas repetidas, antes de recomendar su aplicación en condiciones reales de servicio.

Al comparar el efecto de cada residuo, se observó que el material cerámico presentó una mayor eficiencia con una sustitución del 20%, mientras que, al incrementar la dosificación al 30%, el IP aumentó; esto indica que porcentajes superiores no necesariamente generan un mejor comportamiento. En contraste, el residuo de concreto mostró una reducción del IP conforme aumentó la sustitución, alcanzando su mejor desempeño con el 30%, lo que sugiere que una mayor proporción de partículas rígidas favorece la disminución de la plasticidad del suelo (Huamani-Arango et al., 2025).

Por otra parte, las mezclas híbridas presentaron un comportamiento adverso. La Muestra 6 incrementó el IP hasta el 17.51%, mientras que la Muestra 7 alcanzó el 35.32%; esto la convirtió en la dosificación con mayor plasticidad del estudio. De acuerdo con la reclasificación realizada mediante el SUCS, estas mezclas cuentan con un comportamiento de alta plasticidad, lo que evidencia que la incorporación simultánea de ambos residuos no produce un efecto favorable. Este resultado sugiere que la interacción entre partículas con propiedades físicas diferentes altera el equilibrio de la estructura interna del suelo y provoca una mayor retención de humedad, lo cual convierte al material en una muestra deformable (Bellera Campodarve, 2019).

Esta investigación se limitó a la evaluación de una arcilla procedente de una fuente local y bajo condiciones controladas de laboratorio, por lo que los resultados obtenidos corresponden específicamente a las características mineralógicas del suelo estudiado y a los residuos empleados. Asimismo, la composición de los RCD depende del origen de los materiales de demolición y de sus procesos constructivos, lo cual puede introducir variabilidad en investigaciones futuras (Sangiorgi et al., 2015).

Diversas investigaciones han señalado el potencial de los RCD como una alternativa para promover la economía circular y reducir el impacto ambiental generado por la industria de la construcción (Pacheco Bustos et al., 2020). Sin embargo, la mayoría de los estudios geotécnicos se han enfocado en el empleo de partículas de mayor tamaño para la estabilización de taludes, terraplenes o caminos temporales (Carrascal Caldera y Martelo Oclassen, 2020), mientras que existe información limitada sobre el comportamiento de las fracciones finas de estos residuos en la modificación de los límites de consistencia de suelos cohesivos. En este contexto, los resultados obtenidos aportan evidencia experimental sobre el efecto de diferentes dosificaciones de RCD finamente triturados; asimismo, muestran que la aplicación individual de los residuos, junto con una adecuada selección de la dosificación, constituye un aspecto determinante para reducir la plasticidad del suelo y ampliar las posibilidades de aprovechamiento de estos materiales en aplicaciones geotécnicas.

Conclusiones

En esta investigación se evaluó el efecto de la incorporación de RCD finamente triturados sobre los límites de consistencia y plasticidad de un suelo fino, mediante ensayos desarrollados conforme a la norma ASTM D4318. Los resultados demostraron que el tipo de residuo y su porcentaje de sustitución influyen significativamente en el comportamiento plástico del suelo, lo cual modificó sus valores de LL, LP e IP.

Las sustituciones individuales mostraron un comportamiento favorable en la consistencia de las muestras. La dosificación más destacada fue la compuesta por un 30% de residuo de concreto, la cual disminuyó el IP desde un 14.92% en el suelo base hasta un 0.47%, mientras que la sustitución con un 20% de residuo cerámico alcanzó un IP de 1.62%. Estos resultados evidencian que la incorporación controlada de partículas no plásticas puede reducir de manera progresiva el IP de la muestra y, por consiguiente, disminuir su susceptibilidad a las variaciones de humedad. No obstante, esta reducción debe interpretarse como un indicador del comportamiento de consistencia y no como una demostración suficiente de un mejor desempeño estructural. Por el contrario, las mezclas híbridas incrementaron la plasticidad del suelo y alcanzaron un valor de 17.51% en la sustitución del 20% y, en el caso más crítico, de 35.32% para la dosificación del 30%. La reclasificación realizada mediante el SUCS confirmó que estas dosificaciones mantuvieron un comportamiento correspondiente a materiales de mayor plasticidad; esto indica que la combinación simultánea de residuos cerámicos y de concreto no constituye una alternativa adecuada para reducir la plasticidad del suelo evaluado.

Los resultados obtenidos permiten concluir que los RCD finamente triturados, cuando se emplean de forma individual y bajo dosificaciones adecuadas, representan una alternativa con potencial para el mejoramiento de suelos destinados a aplicaciones geotécnicas donde sea deseable reducir la plasticidad y la susceptibilidad a los cambios de humedad, como en materiales para subrasantes o capas de apoyo. Sin embargo, la aplicación práctica de estas mezclas requiere complementarse con ensayos de capacidad de soporte, resistencia mecánica, expansión y durabilidad antes de considerar su implementación en obras de infraestructura.

El presente estudio se limitó a la evaluación de una arcilla de características locales y al análisis de dosificaciones específicas mediante ensayos de límites de consistencia y plasticidad normados por la norma ASTM D-4318. Por ello, para futuras investigaciones se propone evaluar otros tipos de suelos, diferentes porcentajes de sustitución y residuos de distinta procedencia, además de incorporar ensayos mecánicos y de desempeño a largo plazo bajo condiciones representativas de servicio.

Finalmente, esta investigación aporta evidencia experimental sobre el aprovechamiento de los RCD como materiales sustentables en ingeniería geotécnica; esto contribuye al desarrollo de estrategias en economía circular, al mismo tiempo que establece una base para futuras investigaciones orientadas a validar su comportamiento en aplicaciones reales.

Declaración sobre el uso de Inteligencia Artificial generativa y tecnologías asistidas por IA

Durante la preparación del presente manuscrito, los autores utilizaron ChatGPT (OpenAI) exclusivamente como herramienta de apoyo para la corrección gramatical y la mejora de la redacción. Todo el contenido generado o sugerido por esta herramienta fue revisado, verificado y editado por los autores, quienes asumen plena responsabilidad por la exactitud, originalidad, integridad y rigor científico del contenido final del manuscrito.

Referencias

Aguilar Sulca, E. P., (2023). Estabilización del suelo cohesivo por adición de residuo de concreto demolido, triturado y pulverizado, aplicación centro poblado Aicas, Huanta, Ayacucho (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería. http://hdl.handle.net/20.500.14076/26870

Amorim, E. F., Ribeiro, L. F. M., Santos, J., (2023). Evaluación del módulo de resiliencia en mezclas de suelo y RCD aplicado en obras de pavimentación. In: (Ed.), Tecnologia em controle de obras: 20 anos de contribuições do IFMT para construção civil. Vol. 1. Editora Científica Digital, pp. 444–462.

ASTM International, (2017). Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System) (ASTM D2487-17). https://doi.org/10.1520/D2487-17

ASTM International, (2018a). Standard guide to site characterization for engineering design and construction purposes (ASTM D420-18). https://doi.org/10.1520/D0420-18

ASTM International, (2018b). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils (ASTM D4318-17e1). https://doi.org/10.1520/D4318-17E01

Bellera Campodarve, J., (2019). Evaluación del uso de mezclas de suelos cohesivos con la fracción fina de residuos de construcción y demolición (Trabajo de fin de grado). Universidad de Zaragoza.

Carrascal Caldera, M. C., Martelo Oclassen, A. F., (2020). Determinación de la viabilidad técnica y económica para el uso del concreto tipo RCD en la conformación de estructuras de estabilización de taludes (gaviones) (Trabajo de grado). Universidad de Cartagena. https://doi.org/10.57799/11227/7380

Castaño, J., Misle Rodríguez, R., Lasso, L. A., Gómez Cabrera, A., Ocampo, M. S., (2013). Gestión de residuos de construcción y demolición (RCD) en Bogotá: perspectivas y limitantes. Tecnura 17(38), 121–129. DOI: 10.14483/udistrital.jour.tecnura.2013.4.a09

Cely, P. G. B., Méndez, L. F. G., (2019). Estudio del comportamiento en las arcillas típicas de Bogotá estabilizadas con residuos de construcción y demolición (RCD) (Trabajo de grado). Universidad Católica de Colombia.

Chirinos, E., Rodríguez, E., Muñoz, S., (2021). Métodos de estabilización de suelos arcillosos para mejorar el CBR con fines de pavimentación: una revisión literaria. Suelos Ecuatoriales 51(1), 72–92.

Hidalgo Montoya, C. A., Castrillón Rodríguez, A. M., (2022). Evaluación del desempeño de mezclas de suelo y residuos de la construction como una alternativa para el mejoramiento de subrasantes de vías de bajo volumen de tránsito. Revista Ingenierías Universidad de Medellín 21(41), 1–24.

Huamani-Arango, F., Roncal-Guzmán, F., Poma-Ramos, C., Bonifaz-Palomino, J. J., (2025). Estabilización de suelo arcilloso con residuos de concreto para el mejoramiento de la subrasante de una vía. Scientific Research Journal CIDI 5(9), 79–94. https://doi.org/10.53942/srjcidi.v5i9.251

Juárez Badillo, E., Rico Rodríguez, A., (1992). Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos (Tomo I, 3.ª ed.). Limusa, Ciudad de México, México.

Juárez Badillo, J. B., (2005). Mecánica de suelos (Tomos I y II). Limusa, Ciudad de México, México.

Julca Lozano, W., Mondelli, G., Giacheti, H. L., (2025). Ensayos de laboratorio para la caracterización geotécnica de residuos sólidos de construcción y demolición (RCD). Una revisión sistemática. Sostenibilidad: Económica, Social y Ambiental (7), 91–114. https://doi.org/10.14198/Sostenibilidad.28243

Lauritzen, E. K. (Ed.), (1993). Demolition and reuse of concrete and masonry: proceedings of the third International RILEM Symposium. CRC Press, Boca Ratón, FL, EE. UU. DOI: 10.1201/9781482271270

Lauritzen, E. K., (2019). Construction, demolition and disaster waste management: an integrated and sustainable approach. CRC Press, Boca Ratón, FL, EE. UU. DOI: 10.1201/b20145

López Julián, P., Pueyo Anchuela, Ó., Salesa Bordonoba, Á., Pérez Benedicto, J. Á., (2017). Mejora en la compactabilidad de un suelo limoso mediante la elaboración de mezclas con residuos de construcción y demolición. Geogaceta 61, 179–182. https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/geo61/geo61_45p179_182.pdf

Pacheco Bustos, C. A., Sánchez Cotte, E. H., Páez, C., (2020). Una visión de ciudad sostenible desde el modelo de gestión de los residuos de construcción y demolición (RCD): caso de estudio Barranquilla. Tecnura 24(63), 57–72. DOI: 10.14483/22487638.15359

Robayo, R., Mattey, P., Silva, Y., Burgos, D., Delvasto, S., (2015). Los residuos de la construcción y demolición en la ciudad de Cali: un análisis hacia su gestión, manejo y aprovechamiento. Tecnura 19(44), 157–170. https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.2.a12

Sangiorgi, C., Lantieri, C., Dondi, G., (2015). Construction and demolition waste recycling: an application for road construction. International Journal of Pavement Engineering 16(6), 530–537. DOI: 10.1080/10298436.2014.993201