UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Tesis:

Reutilización de residuos de demolición para mejorar la resistencia al corte en suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca 2025

Asesor

Mag. Maldonado Mendivil, Ángel

Autor

Choque Durand, Fermin

Para optar título profesional de:

Ingeniero civil

Abancay, Apurímac – Perú

2026

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Acta N°: 054

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TÍTULO PROFESIONAL

En la ciudad de Abancay, a los veinticuatro (24) días del mes de septiembre del 2026, siendo las 9: 00 am horas, se reunieron los integrantes del Jurado designado por Resolución Directoral N° 0670-2026-EPIC-FI-UTEA-SA de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería:

Presidente	:	Mag. ROLDAN JUAREZ, Américo
Dictaminante:		Dra. VERA TEVES, Rosa Marina
Replicante	:	Mag OCHOA ALTAMIRANO, Alexis Raúl

Para evaluar la sustentación, en la modalidad de:

☒ Tesis ☐ Trabajo de suficiencia profesional

Titulada: ***Reutilización de residuos de demolición para mejorar la resistencia al corte en suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca 2025***

Desarrollado por el (los) Bachiller (es):

Br. : CHOQUE DURAND, Fermín

Para optar el Tituló Profesional de:

Ingeniero Civil

Concluido el acto, el Jurado dictaminó que el (la) (los) mencionado(a) (s) bachiller (es) fue (ron) APROBADO(S) ☒ o DESAPROBADO(S) ☐:

Emitiéndose el calificativo final de:

Bachiller	Nota	Detalle (**)
Br. CHOQUE DURAND, Fermín	13	APROBADO

Siendo las 10:20 horas concluyó la sesión, firmando los integrantes del Jurado.

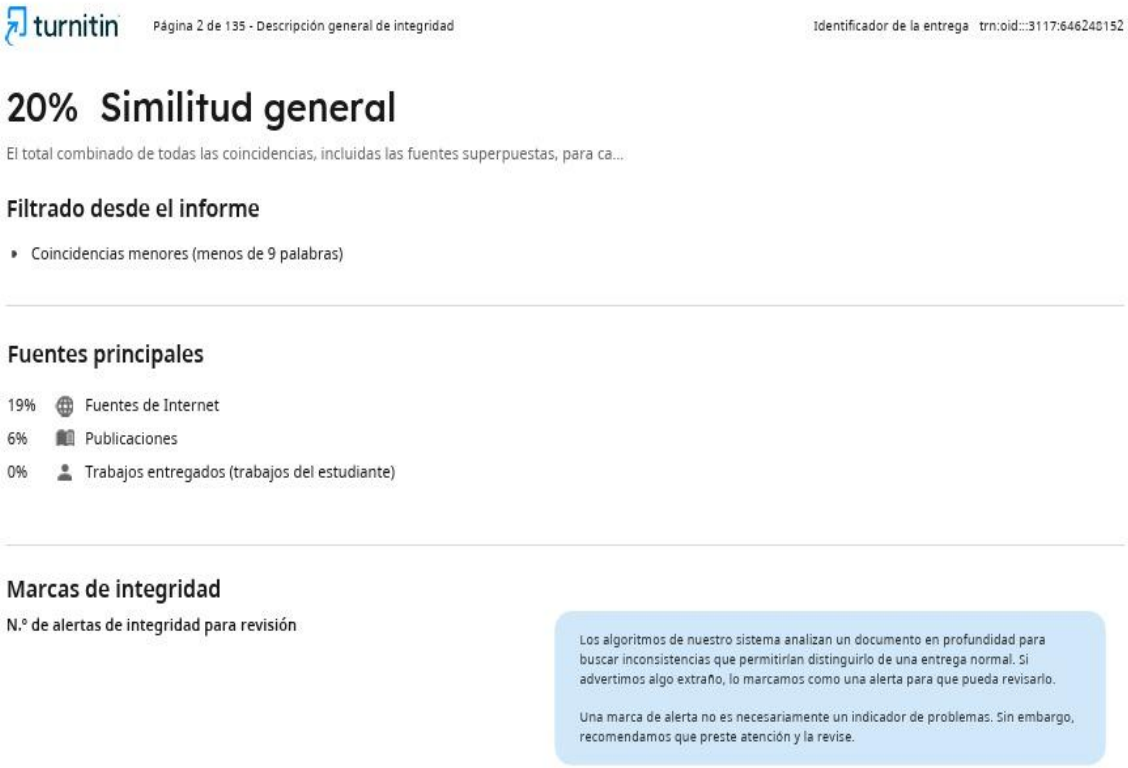
Presidente: Mag. ROLDAN JUAREZ, Américo (.....)

Dictaminante: Dra. VERA TEVES, Rosa Marina (.....)

Replicante: Mag OCHOA ALTAMIRANO, Alexis Raúl (.....)

Nota: Desaprobado: 0-10; Aprobado: 11-20

Reporte de similitud



turnitin Página 2 de 135 - Descripción general de integridad Identificador de la entrega trn:oid:::3117:646240152

20% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Coincidencias menores (menos de 9 palabras)

Fuentes principales

19% Fuentes de Internet
6% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.° de alertas de integridad para revisión

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Metadatos

Datos del Autor		
Apellidos y nombres	:	CHOQUE DURAND, Fermin
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	42871443
URL ORCID	:	https://orcid.org/0009-0003-7920-6393
Datos del Asesor		
Apellidos y Nombres	:	Mag. MALDONADO MENDIVIL, Ángel
Tipo de Documento de Identidad	:	DNI
Numero de Documento de Identidad	:	06788424
URL ORCID	:	https://orcid.org/0000-0001-9002-1910
Datos de la Investigación		
Facultad	:	Ingeniería
Escuela Profesional	:	Ingeniería Civil
Línea de Investigación	:	Gestión De La Infraestructura Para El Desarrollo Sostenible
Rango de años en el que se realizó la investigación	:	2024 – 2026
Fuente de Financiamiento	:	Financiamiento propio
Porcentaje de similitud	:	14%
URL de OCDE	:	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01

Dedicatoria:

A mis queridos padres. Este logro académico es un reflejo del incansable esfuerzo que han invertido para brindarme una educación sólida. Cada sacrificio que han hecho, cada día de trabajo duro y cada decisión que tomaron en mi nombre son el fundamento de mi éxito.

A mi esposa Jessica. En los días turbulentos, has sido mi ancla, y en los buenos momentos, mi razón de sonrisas. Esta tesis se teje con hilos de tu amor y apoyo, un reflejo de la seguridad que me brindas. Gracias por apoyarme en mis momentos de flaqueza. Eres la melodía que da ritmo a mi viaje y la paz en medio de la tormenta

Agradecimientos

A Dios por guiarme en todo momento de mi vida, a mi esposa por su apoyo incondicional ser el pilar en mis momentos difíciles.

A mis padres y a mi asesor Mag. Ángel Maldonado Mendívil por su apoyo y exigencia constante para el logro de este objetivo.

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo planificar la reutilización de residuos de demolición en la mejora de la resistencia al corte en suelos arenosos, con fines de aplicación en cimentaciones. Se utilizó ladrillo triturado como único material reciclado, incorporado al suelo en proporciones de 5 %, 10 % y 15 %. La metodología incluyó ensayos de laboratorio como granulometría, corte directo, Proctor modificado, aplicados a muestras de suelo natural con los distintos porcentajes de adición. Los resultados mostraron una mejora progresiva en la resistencia al corte con el aumento del contenido de ladrillo reciclado. La cohesión del suelo incrementó significativamente, mientras que el ángulo de fricción interna se mantuvo estable. La densidad seca máxima aumentó hasta el 10 % de adición. Se concluye que el ladrillo reciclado mejora las propiedades mecánicas del suelo arenoso, especialmente en proporciones de 10 % a 15 %, siendo una alternativa técnica viable y ambientalmente sostenible para cimentaciones.

Palabras clave: residuos de demolición, ladrillo reciclado, suelos arenosos, resistencia al corte y cimentaciones sostenibles.

Abstract

The present research aimed to plan the reuse of demolition waste to improve the shear strength of sandy soils for application in foundations. Crushed brick was used as the sole recycled material, incorporated into the soil in proportions of 5%, 10%, and 15%. The methodology included laboratory tests such as direct shear, modified Proctor. The results showed a progressive improvement in shear strength as the amount of recycled brick increased. Soil cohesion increased significantly, while the internal friction angle remained stable. The maximum dry density increased up to the 10% addition. It is concluded that recycled brick enhances the mechanical properties of sandy soil, especially at proportions of 10% to 15%, making it a technically viable and environmentally sustainable alternative for foundations.

Key words: demolition waste, recycled brick, sandy soils, shear strength, and sustainable foundations.

Índice General

Portada ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Acta de sustentación ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Reporte de similitud iii

Metadatos iv

Dedicatoria: v

Agradecimientos vi

Resumen vii

Abstract viii

Índice General ix

Índice de tablas xi

Índice de figuras xii

Índice de anexos xiv

I. Introducción 16

II. Planteamiento del problema 20

2.1. Descripción y formulación del problema 20

2.2. Objetivos 25

2.2.1. Objetivo General 25

2.2.2. Objetivos Específicos 25

2.3. Justificación e importancia 26

2.4. Hipótesis 29

2.5. Variables 29

III. Marco teórico 30

3.1. Antecedentes de Investigación. 30

3.2. Modelo conceptual de la investigación 36

3.3. Bases teóricas 37

3.4. Definición de términos 48

IV. Metodología 52
4.1. Tipo y nivel de investigación 52
4.1.1 Tipo de investigación 52
4.1.2 Nivel de investigación 52
4.1.3 Diseño de la investigación 53
4.2. Ámbito temporal y espacial 54
4.2.1 Ámbito temporal 54
4.2.2 Espacial 54
4.3. Población y muestra 54
4.3.1 Población 54
4.3.2 Muestra 55
4.4. Instrumentos 55
4.5. Procedimientos 57
4.6. Análisis de datos 69
4.7. Consideraciones éticas 72
V. Resultados y discusión 74
5.1. Resultados 74
5.2. Discusión de resultados 107
VI. Conclusiones 110
VII. Recomendaciones 112
VIII.Referencias 114
IX. Anexos 120

Índice de tablas

Tabla 1. Ensayos realizados y normas ASTM aplicadas 55
Tabla 2. Resultados del ensayo granulométrico a diferentes porcentajes de adición de residuos de demolición (ladrillos) 74
Tabla 3. Cuadro resumen de resultados del ensayo de corte directo, muestras de suelo arenoso + 0% de residuos de demolición 79
Tabla 4. Cuadro resumen de resultados del ensayo de corte directo, muestras de suelo arenoso + 5% de residuos de demolición 81
Tabla 5. Cuadro resumen de resultados del ensayo de corte directo, muestras de suelo arenoso + 10% de residuos de demolición 83
Tabla 6. Cuadro resumen de resultados del ensayo de corte directo, muestras de suelo arenoso + 15% de residuos de demolición 85
Tabla 7. Resultados finales de corte directo para las dosificaciones de residuos de demolición 86
Tabla 8. Resultados finales para el ensayo de densidad seca máxima para las dosificaciones 90
Tabla 9. Resultados descriptivos del esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm 94
Tabla 10. Resultados descriptivos del esfuerzo al corte kg/cm2 a 5.08mm 97
Tabla 11. Comparación del esfuerzo al corte kg/cm2 a 5.08mm 98
Tabla 12. Anova para esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm 100
Tabla 13. Prueba de Tukey para el esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm 101
Tabla 14. Anova para del esfuerzo al corte kg/cm2 a 5.08mm 103
Tabla 15. Prueba de Tukey para el esfuerzo corte kg/cm2 a 5.08mm 104

Índice de figuras

Figura 1. Diagrama: Modelo conceptual de la investigación 36
Figura 2. Esquema de Reutilización de residuos de construcción y demolición en el mejoramiento de suelos arenosos 37
Figura 3. Esquema de resistencia al corte en suelos arenosos 40
Figura 4. Esquema de capacidad portante en cimentaciones superficiales 42
Figura 5. Esquema de aplicación del mejoramiento de suelos con RCD en la ciudad de Nazca 45
Figura 6. Esquema de relación entre variables e indicadores 47
Figura 7. Ubicación de la zona de extracción de residuos de demolición 57
Figura 8. Ubicación de la zona de muestreo 58
Figura 9. Muestras de suelo arenoso 59
Figura 10. Ladrillo cocido molido, residuo de demolición 61
Figura 11. Insertado de muestra al horno a 110°C 61
Figura 12. Preparación de muestras y tamices - Ensayo granulométrico 62
Figura 13. Tamices 62
Figura 14. Investigador apisonando muestra para ensayo de Proctor modificado 64
Figura 15. Ensayo de corte directo - Equipo 65
Figura 16. Diagrama de flujo del procedimiento general de la investigación 65
Figura 17. Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de materiales 66
Figura 18. Diagrama de flujo del procedimiento del ensayo granulométrico 66
Figura 19. Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de mezclas suelo - ladrillo 67
Figura 20. Diagrama de flujo del procedimiento del ensayo de Proctor modificado **67**
Figura 21. Diagrama de flujo del procedimiento de ensayo de Corte directo 6**8**
Figura 22. Curvas granulométricas comparativas 7**6**
Figura 23. Resultados del ensayo corte directo, muestras de suelo arenoso + 0% de residuos de demolición 7**8**
Figura 24. Deformación horizontal y vertical, muestras de suelo arenoso + 0% de residuos de demolición 78
Figura 25. Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 0% de residuos de demolición 7**9**

Figura 26. Resultados del ensayo corte directo, muestras de suelo arenoso + 5% de residuos de demolición **80**
Figura 27. Deformación horizontal y vertical, muestras de suelo arenoso + 5% de residuos de demolición 80
Figura 28. Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 5% de residuos de demolición 81
Figura 29. Resultados del ensayo corte directo, muestras de suelo arenoso + 10% de residuos de demolición 82
Figura 30. Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 10% de residuos de demolición 82
Figura 31. Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 10% de residuos de demolición 83
Figura 32. Resultados del ensayo corte directo, muestras de suelo arenoso + 15% de residuos de demolición 84
Figura 33. Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 15% de residuos de demolición 84
Figura 34. Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 15% de residuos de demolición 85
Figura 35. Densidad seca máxima, muestras de suelo arenoso + 0% de adición de residuos de demolición 87
Figura 36. Densidad seca máxima, muestras de suelo arenoso + 5% de adición de residuos de demolición 88
Figura 37. Densidad seca máxima, muestras de suelo arenoso + 10% de adición de residuos de demolición 89
Figura 38. Densidad seca máxima, muestras de suelo arenoso + 15% de adición de residuos de demolición 90
Figura 39. Comparación del esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm 96

Índice de anexos

Anexo 1: Matriz de consistencia 120
Anexo 2: Operacionalización de variables 123
A**nexo 3**: Informe de laboratorio 125

I. Introducción

A nivel mundial, el sector de la construcción se ha consolidado como uno de los principales generadores de residuos sólidos, alcanzando cifras alarmantes que representan aproximadamente el 30 % de los desechos totales, según la Agencia Internacional de Energía (IEA). El crecimiento poblacional, la urbanización acelerada y la demanda constante de nuevas infraestructuras intensifican este escenario, generando impactos negativos en el ambiente, como la contaminación del aire, del agua y del suelo. Frente a esta problemática, la tendencia internacional se ha orientado hacia la reutilización y el reciclaje de residuos de construcción y demolición (RCD), enmarcados dentro de estrategias de economía circular y sostenibilidad. Países europeos han avanzado en la implementación de normativas que promueven la reincorporación de materiales de demolición en procesos constructivos, particularmente en estabilización de suelos y mejoramiento de pavimentos.

En el caso del Perú, el panorama es complejo. Se estima que, en promedio, las principales ciudades generan alrededor de 5 millones de toneladas de RCD anuales, según reportes del Ministerio del Ambiente (MINAM). Sin embargo, la gestión de estos residuos todavía presenta serias limitaciones: proliferan botaderos clandestinos y la disposición inadecuada de escombros en áreas urbanas genera externalidades ambientales y sociales. Aunque existen esfuerzos recientes por promover la sostenibilidad en la construcción, mediante proyectos de infraestructura vial y programas de construcción social, aún persiste una brecha considerable en la implementación de técnicas que aprovechen de manera eficiente los residuos de demolición.

Dentro de este contexto, la ciudad de Nazca representa un caso particular de estudio. Su localización en una región sísmica y sus características geológicas con

predominio de suelos arenosos generan dificultades adicionales en el ámbito constructivo. Los suelos arenosos se caracterizan por su baja cohesión y resistencia al corte, lo que compromete la estabilidad de cimentaciones y aumenta la vulnerabilidad de las edificaciones frente a eventos sísmicos.

En este estudio, el análisis se orienta específicamente a cimentaciones no profundas, tales como zapatas aisladas, zapatas corridas y losas de cimentación, empleadas principalmente en edificaciones de baja altura. Se considera como ámbito de aplicación viviendas de hasta dos o tres pisos como máximo, las cuales representan el tipo de construcción predominante en la ciudad de Nazca.

Al mismo tiempo, el crecimiento urbano de Nazca ha generado un incremento en la cantidad de escombros y residuos de demolición, los cuales, al no ser gestionados adecuadamente, se convierten en un problema ambiental y social.

Ante esta realidad, surge la oportunidad de investigar el potencial de los residuos de demolición como material alternativo para la estabilización de suelos arenosos. En particular, el reciclaje de ladrillo triturado podría contribuir no solo a mejorar las propiedades mecánicas del suelo como la cohesión y la resistencia al corte, sino también a reducir la cantidad de residuos que actualmente carecen de un destino productivo. La reutilización de estos materiales permitiría, además, disminuir costos de construcción al reemplazar agregados convencionales, reforzando el compromiso con prácticas sostenibles.

La presente investigación se orientó a planificar la reutilización de residuos de demolición en la mejora de la resistencia al corte en suelos arenosos, con fines de aplicación en cimentaciones superficiales o no profundas, destinadas a viviendas de baja altura (hasta tres niveles como máximo). Para ello, se evaluaron mezclas de suelo

natural con ladrillo triturado en proporciones de 5 %, 10 % y 15 %, mediante ensayos de laboratorio como corte directo y Proctor modificado. Los resultados obtenidos evidencian un incremento progresivo en la resistencia al corte del suelo tratado, con mejoras significativas en la cohesión, sin afectar de manera relevante el ángulo de fricción interna. Asimismo, se observó un aumento de la densidad seca máxima hasta un 10 % de adición.

De este modo, el estudio demuestra que la incorporación de residuos de demolición, específicamente ladrillo triturado, constituye una alternativa técnica viable y ambientalmente sostenible para la estabilización de suelos arenosos en Nazca. Además de contribuir al desarrollo de cimentaciones más seguras y resistentes, esta práctica favorece la reducción del impacto ambiental asociado a la disposición inadecuada de RCD, alineándose con las tendencias internacionales de sostenibilidad en la construcción y con la necesidad de soluciones innovadoras en el contexto peruano. Los resultados obtenidos son aplicables al diseño preliminar de cimentaciones superficiales para viviendas de hasta tres pisos, bajo condiciones geotécnicas similares a las evaluadas en la ciudad de Nazca.

La presente tesis se encuentra organizada en seis capítulos:

- En el **Capítulo I**, correspondiente a la Introducción, se presenta el contexto general de la problemática asociada a la generación de residuos de demolición y las limitaciones geotécnicas de los suelos arenosos, así como la justificación y alcance del estudio.
- El **Capítulo II** desarrolla el planteamiento del problema, donde se formulan el problema general y los problemas específicos, los objetivos, la

justificación, las hipótesis y la identificación de las variables de investigación.

- En el **Capítulo III** se expone el marco teórico, que comprende los antecedentes internacionales, nacionales y locales, las bases teóricas relacionadas con los residuos de construcción y demolición, la resistencia al corte de suelos arenosos y la definición de los principales términos utilizados en la investigación.
- El **Capítulo IV** describe la metodología empleada, detallando el tipo y nivel de investigación, el ámbito temporal y espacial, la población y muestra, los instrumentos utilizados, los procedimientos experimentales, el análisis de datos y las consideraciones éticas.
- En el **Capítulo V** se presentan los resultados obtenidos y su interpretación técnica en función de su aplicabilidad en cimentaciones superficiales para edificaciones de baja altura a partir de los ensayos de laboratorio realizados, acompañados de su respectiva discusión e interpretación en función de los objetivos planteados.
- Finalmente, el **Capítulo VI** contiene las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio, así como las referencias bibliográficas que sustentan la investigación.

II. Planteamiento del problema

2.1. Descripción y formulación del problema

A nivel mundial, el crecimiento urbano acelerado y el incremento de las actividades de construcción y demolición han generado grandes volúmenes de residuos de construcción y demolición (RCD), convirtiéndose en uno de los principales problemas ambientales del sector construcción. Según Pacheco et al. (2013), "la generación masiva de residuos de demolición representa un desafío ambiental debido a su inadecuada disposición final y al limitado aprovechamiento de materiales reciclables en obras de ingeniería civil" (p.3).

Asimismo, Kibert (2016) "señala que la reutilización y el reciclaje de residuos de construcción constituyen estrategias sostenibles que permiten reducir el impacto ambiental, disminuir el consumo de recursos naturales y promover la economía circular en el sector construcción" (p.57). En diversos países desarrollados se vienen implementando tecnologías y normativas orientadas al aprovechamiento de residuos de demolición como materiales alternativos para la estabilización y mejoramiento de suelos destinados a cimentaciones y pavimentos.

Sin embargo, en muchos países en desarrollo, la gestión inadecuada de los residuos de demolición continúa generando contaminación ambiental y desaprovechamiento de materiales potencialmente reutilizables. Esta situación evidencia la necesidad de investigar alternativas sostenibles que permitan incorporar residuos reciclados en aplicaciones geotécnicas, especialmente en suelos con baja resistencia al corte.

En el contexto internacional, diversos países han promovido políticas orientadas a la reutilización y reciclaje de residuos de construcción y demolición como estrategia

para reducir los impactos ambientales generados por el sector construcción. Según European Commission (2020), la valorización de residuos de demolición contribuye significativamente a la conservación de recursos naturales y al desarrollo de una economía circular sostenible.

Asimismo, investigaciones desarrolladas en países europeos evidencian que los materiales reciclados provenientes de residuos de demolición pueden ser utilizados en obras de infraestructura vial y mejoramiento de suelos, logrando resultados favorables en las propiedades mecánicas y geotécnicas de los materiales tratados. En ese sentido, Brito et al. (2021) sostienen que el "uso de residuos reciclados en ingeniería civil representa una alternativa técnica y ambientalmente viable para reducir el consumo de materiales convencionales" (p.5).

En el Perú, la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) constituye un problema ambiental significativo. Según el Ministerio del Ambiente (2022), las principales ciudades del país generan aproximadamente 5 millones de toneladas de residuos de construcción y demolición al año, representando cerca del 70 % de los residuos sólidos urbanos no municipales. Asimismo, menos del 2 % de estos residuos recibe algún tipo de reaprovechamiento formal, mientras que gran parte es dispuesta en botaderos informales, riberas de ríos y espacios públicos, generando impactos negativos sobre el ambiente y la salud pública.

Esta problemática se ha incrementado debido al crecimiento urbano y al aumento de proyectos de vivienda e infraestructura en distintas ciudades del país. En ese sentido, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (2023) señala que el crecimiento urbano sostenido ha generado mayores volúmenes de escombros provenientes de actividades de demolición, remodelación y ampliación urbana.

Asimismo, Julca et al. (2024) indican que los “residuos de construcción y demolición presentan propiedades geotécnicas favorables que permiten su aprovechamiento en aplicaciones de ingeniería civil y mejoramiento de suelos”.

Sin embargo, en el contexto nacional, la reutilización de residuos de construcción y demolición en aplicaciones geotécnicas, como el mejoramiento de suelos para cimentaciones, aún es limitada y no se aplica de manera sistemática, predominando prácticas informales de disposición y relleno sin control técnico.

En el ámbito local, la ciudad de Nazca presenta condiciones que agravan la problemática relacionada con la generación y disposición inadecuada de residuos de construcción y demolición. Según la Municipalidad Provincial de Nazca (2023), el crecimiento urbano registrado durante la última década ha generado un incremento de obras de vivienda, comercio y renovación de infraestructura, ocasionando una mayor producción de residuos de demolición, principalmente ladrillo y concreto. Sin embargo, la ciudad no cuenta con infraestructura formal para la segregación, tratamiento y reaprovechamiento de residuos de construcción y demolición, por lo que estos materiales son dispuestos frecuentemente en zonas periféricas, quebradas y espacios abiertos, generando impactos ambientales y paisajísticos negativos.

Desde el punto de vista geotécnico, Nazca se caracteriza por la presencia predominante de suelos arenosos de baja cohesión, condición que, según estudios del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (2021), incrementa la vulnerabilidad de las edificaciones frente a cargas estructurales y eventos sísmicos, especialmente cuando no se aplican técnicas adecuadas de mejora del suelo. Esta situación es particularmente relevante considerando que Nazca se ubica en una zona de alta sismicidad, donde la

resistencia al corte del suelo juega un papel determinante en la estabilidad de las cimentaciones.

En este contexto, la reutilización de residuos de demolición como material de mejora para suelos arenosos representa una alternativa técnica con doble beneficio: por un lado, permitiría incrementar la resistencia al corte y la capacidad portante del suelo, y por otro, contribuiría a reducir el volumen de residuos dispuestos inadecuadamente en la ciudad de Nazca. Sin embargo, la escasez de investigaciones experimentales locales que evalúen cuantitativamente el efecto de estos residuos sobre las propiedades mecánicas del suelo en Nazca limita su aplicación práctica. Por ello, resulta necesario desarrollar estudios que demuestren su viabilidad técnica y económica, proporcionando evidencia científica que respalde su uso en proyectos de cimentación dentro del contexto local y nacional.

La investigación se delimitó geográficamente en la ciudad de Nazca, ubicada en la provincia de Nazca, región Ica, al sur del Perú. El estudio se centró específicamente en zonas urbanas y periurbanas de la ciudad donde predominan suelos arenosos y se desarrollan obras de edificación que requieren cimentaciones superficiales. Asimismo, los residuos de demolición utilizados en la investigación procedieron de actividades constructivas y de demolición realizadas dentro del ámbito urbano de la ciudad, garantizando la representatividad local del material reciclado empleado.

La investigación se desarrolló durante el período 2024–2025, comprendiendo las etapas de recopilación de información, muestreo de suelos y residuos de demolición, ejecución de ensayos de laboratorio, análisis de resultados y elaboración del informe final. Los datos experimentales obtenidos corresponden exclusivamente a este intervalo

temporal, por lo que las conclusiones del estudio se circunscriben a las condiciones técnicas y ambientales vigentes en dicho periodo.

Desde el punto de vista temático, la investigación se delimitó al análisis de la reutilización de residuos de demolición, específicamente ladrillo triturado, como material de mejora para la resistencia al corte de suelos arenosos destinados a cimentaciones el estudio se orienta específicamente a cimentaciones superficiales o no profundas, tales como zapatas aisladas, zapatas corridas y losas de cimentación, empleadas comúnmente en edificaciones de baja altura. En ese sentido, el alcance de la investigación se circunscribe a viviendas de hasta dos o tres pisos como máximo, que constituyen el tipo de edificación predominante en la ciudad de Nazca. El estudio se enfocó en la evaluación de parámetros geotécnicos fundamentales para cimentaciones superficiales, como la cohesión y el ángulo de fricción interna, obtenidos mediante ensayos de laboratorio. No se abordaron aspectos relacionados con la plasticidad del suelo, el comportamiento dinámico sísmico, el análisis estructural de edificaciones ni la evaluación económica a escala de proyectos, limitándose el alcance a la verificación técnica y experimental del comportamiento del suelo mejorado.

En consecuencia, la problemática abordada se centra en determinar si la reutilización de residuos de demolición puede mejorar parámetros geotécnicos determinantes para el diseño preliminar de cimentaciones superficiales en edificaciones de baja altura, bajo las condiciones específicas de los suelos arenosos de Nazca.

Frente a ello nace la pregunta general de investigación: ¿Cómo influye la adición de residuos de demolición en la mejora de la resistencia al corte en suelos arenosos destinados a cimentaciones?

Problemas General

- ¿De qué manera la reutilización de residuos de demolición influye en la mejora de la resistencia al corte de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025?

Problemas Específicos

- ¿Cómo influye la reutilización de residuos de demolición en la resistencia mecánica de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025?
- ¿Cómo influye la reutilización de residuos de demolición en la capacidad de compactación de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025?
- ¿De qué manera la reutilización de residuos de demolición influye en la capacidad portante de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025?

2.2. Objetivos

2.2.1. Objetivo General

Determinar la influencia de la reutilización de residuos de demolición en la mejora de la resistencia al corte de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025.

2.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la influencia de la reutilización de residuos de demolición en la resistencia mecánica de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025.

- Evaluar la influencia de la reutilización de residuos de demolición en la capacidad de compactación de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025.
- Analizar la influencia de la reutilización de residuos de demolición en la capacidad portante de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025.

2.3. Justificación e importancia

Justificación Técnica

Desde el punto de vista técnico, la investigación se justifica porque evalúa experimentalmente la reutilización de residuos de demolición como material de mejora de la resistencia al corte de suelos arenosos, condición fundamental para el diseño y la estabilidad de las cimentaciones En el presente estudio, dicha aplicación se circunscribe específicamente al diseño preliminar de cimentaciones superficiales o no profundas, tales como zapatas aisladas, zapatas corridas y losas de cimentación, utilizadas comúnmente en viviendas de baja altura. Este enfoque resulta pertinente para edificaciones de hasta dos o tres pisos como máximo, cuya demanda estructural es compatible con soluciones de cimentación superficial sobre suelos mejorados. Mediante ensayos de laboratorio estandarizados, como corte directo, Proctor modificado, el estudio permite cuantificar el efecto del ladrillo triturado sobre parámetros geotécnicos clave, tales como la cohesión, el ángulo de fricción interna, la densidad seca máxima y la capacidad de soporte. De este modo, la investigación aporta evidencia técnica que puede ser utilizada como referencia para la aplicación controlada de residuos de demolición en obras de cimentación ejecutadas sobre suelos arenosos en la ciudad de Nazca.

De esta manera, la investigación aporta sustento técnico para evaluar la viabilidad del suelo mejorado frente a cargas típicas de viviendas de baja altura, considerando que en cimentaciones superficiales la resistencia al corte del terreno constituye el parámetro esencial para la estimación de la capacidad portante y el control de asentamientos.

Justificación Teórica

La justificación teórica radica en el aporte al conocimiento científico en el campo de la ingeniería geotécnica, específicamente en el estudio del comportamiento mecánico de suelos arenosos mejorados con materiales reciclados. La investigación se sustenta en los principios de la mecánica de suelos y en las teorías de resistencia al corte, ampliando la comprensión del efecto que tienen los residuos de demolición sobre suelos granulares de baja cohesión. Asimismo, los resultados obtenidos contribuyen a fortalecer el marco teórico existente y sirven como base para futuras investigaciones relacionadas con la estabilización de suelos mediante el uso de materiales alternativos y sostenibles.

Justificación Económica

Desde la perspectiva económica, la investigación se justifica porque propone una alternativa de bajo costo para la mejora de suelos destinados a cimentaciones, al utilizar residuos de demolición disponibles localmente en lugar de materiales convencionales que implican mayores costos de extracción, transporte y adquisición. La reutilización de estos residuos permite reducir los gastos asociados a la estabilización del suelo y, al mismo tiempo, disminuir los costos de disposición final de escombros. Esta propuesta resulta especialmente relevante para proyectos de edificación y obras de infraestructura desarrolladas en la ciudad de Nazca, donde los presupuestos suelen ser limitados.

Justificación Social

La justificación social de la investigación se sustenta en su contribución a la gestión sostenible de los residuos de construcción y demolición, problema recurrente en la ciudad de Nazca. Al promover el reaprovechamiento de estos residuos, el estudio favorece la reducción de botaderos informales y la ocupación indebida de espacios públicos, lo que repercute positivamente en el entorno urbano y en la salud de la población. Asimismo, al contribuir al diseño de cimentaciones más seguras sobre suelos arenosos, la investigación aporta indirectamente a la seguridad estructural de las edificaciones, reduciendo el riesgo de fallas y mejorando la calidad de vida de la población.

Viabilidad del proyecto

La presente investigación es viable técnica, económica y operativamente, debido a la disponibilidad local de los materiales y recursos necesarios para su ejecución. Los residuos de demolición, específicamente ladrillo triturado, se obtuvieron de actividades constructivas realizadas en la ciudad de Nazca, lo que permitió su adquisición a bajo costo o sin costo alguno. Asimismo, los ensayos de laboratorio empleados, como corte directo y Proctor modificado, que permiten determinar parámetros fundamentales de resistencia al corte, corresponden a pruebas estandarizadas ampliamente utilizadas en la ingeniería civil y disponibles en laboratorios geotécnicos de la región. Los recursos humanos y técnicos requeridos se limitaron al investigador, el asesor académico y el uso de equipamiento convencional de laboratorio, sin necesidad de tecnología especializada de alto costo. En este sentido, los costos asociados al desarrollo del estudio resultan accesibles y compatibles con un financiamiento propio, garantizando la factibilidad de ejecución del proyecto dentro del tiempo y presupuesto establecidos.

2.4. Hipótesis

Hipótesis General

La reutilización de residuos de demolición influye significativamente en la mejora de la resistencia al corte de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025.

Hipótesis Especificas

- La reutilización de residuos de demolición incrementa significativamente la resistencia mecánica de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025.
- La reutilización de residuos de demolición mejora significativamente la capacidad de compactación de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025.
- La reutilización de residuos de demolición incrementa significativamente la capacidad portante de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, 2025.

2.5. Variables

Variable independiente: Residuos de demolición (ladrillo triturado)

Variable dependiente: Resistencia al corte del suelo arenoso

III. Marco teórico

3.1. Antecedentes de Investigación.

A nivel internacional

Según Silva y Santos (2020), en Brasil se desarrolló la investigación titulada "*Aprovechamiento de residuos de construcción y demolición para mejorar las propiedades geotécnicas de suelos arenosos",* cuyo objetivo fue evaluar el efecto de la incorporación de residuos de demolición en la resistencia al corte de suelos utilizados en cimentaciones. La metodología empleada fue de tipo experimental y consistió en la elaboración de mezclas de suelo con porcentajes de residuos del 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, realizándose ensayos de corte directo y pruebas triaxiales para determinar el comportamiento mecánico del material. Los resultados evidenciaron que las mezclas con contenidos entre 15 % y 20 % de residuos presentaron un incremento significativo en la cohesión y en el ángulo de fricción interna, mejorando la resistencia al corte y estabilidad del terreno. En conclusión, el estudio demostró que la reutilización de residuos de construcción y demolición constituye una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible para el mejoramiento geotécnico de suelos arenosos destinados a cimentaciones.

Según Yildiz y Demir (2019), en Turquía se desarrolló la investigación titulada "*Mejora del comportamiento mecánico de suelos arenosos mediante residuos reciclados en la construcción de carreteras"*, cuyo objetivo fue evaluar la estabilidad de suelos tratados con residuos reciclados aplicados a proyectos viales. La metodología utilizada fue de tipo cuantitativa-experimental y se desarrolló mediante ensayos de laboratorio y pruebas de campo, empleando mezclas de suelo con porcentajes de residuos reciclados del 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 25. Asimismo, se realizaron ensayos de compactación Proctor, corte directo y pruebas de durabilidad para evaluar la cohesión, ángulo de fricción interna y estabilidad del material. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la compactación, resistencia al corte y comportamiento mecánico de los suelos tratados. En conclusión, la investigación determinó que la incorporación de residuos reciclados constituye una alternativa eficiente y sostenible para mejorar la estabilidad de suelos arenosos en proyectos de infraestructura vial.

Según Zhang y Liu (2018), en China se desarrolló una investigación sobre la reutilización de residuos de construcción para la estabilización de suelos en áreas urbanas, cuyo objetivo fue evaluar la influencia de dichos materiales en la estabilidad y resistencia mecánica del terreno. La metodología empleada fue de tipo experimental y consistió en la elaboración de muestras de suelo con diferentes porcentajes de residuos de construcción, realizándose ensayos de corte directo, compresión y pruebas bajo condiciones controladas de humedad y sequía para simular distintos escenarios ambientales. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la resistencia al corte, capacidad portante y estabilidad de los suelos tratados, especialmente frente a variaciones de humedad. En conclusión, el estudio confirmó que los residuos de construcción pueden utilizarse como material estabilizador para mejorar las propiedades geotécnicas de suelos arenosos en zonas urbanas.

Según Gómez y Ruiz (2021), en España se desarrolló una investigación enfocada en la utilización de residuos de demolición para el mejoramiento de suelos arenosos destinados a cimentaciones, cuyo objetivo fue determinar la efectividad de estos materiales en el incremento de la resistencia y estabilidad del suelo. La metodología incluyó ensayos de laboratorio en mezclas de suelo con diferentes proporciones de residuos de demolición, evaluando además el comportamiento del material mediante ciclos de humedad y sequía. Los resultados demostraron que las mezclas con 15 % de residuos presentaron un incremento significativo en la cohesión y una reducción de la permeabilidad, favoreciendo la capacidad portante y estabilidad del suelo para cimentaciones superficiales. En conclusión, la reutilización de residuos de demolición constituye una alternativa sostenible para el mejoramiento geotécnico de suelos arenosos y la adecuada gestión de residuos de construcción.

A nivel nacional

De acuerdo con Paredes y Salazar (2019), en la ciudad de Lima se desarrolló una investigación sobre la evaluación de residuos de demolición para la estabilización de suelos en proyectos urbanos, cuyo objetivo fue analizar la influencia de estos materiales en las propiedades mecánicas de suelos arenosos. La metodología empleada consistió en la realización de ensayos de corte directo, compactación y permeabilidad en mezclas de suelo con proporciones de residuos del 5 %, 10 % y 15 %. Los resultados evidenciaron una mejora considerable en la compactación y capacidad portante del suelo con la incorporación de un 10 % de residuos de demolición, además de una disminución de la permeabilidad y un incremento en la cohesión del material. En conclusión, el estudio determinó que la incorporación de residuos de demolición mejora significativamente las propiedades mecánicas de los suelos arenosos, constituyendo una alternativa viable para la estabilización de terrenos en proyectos urbanos.

Según Mendoza y Castro (2020), en la ciudad de Trujillo se desarrolló una investigación enfocada en el uso de materiales reciclados para mejorar la resistencia de suelos arenosos empleados en construcciones residenciales, cuyo objetivo principal fue evaluar la eficiencia de estos materiales en el incremento de la estabilidad de suelos costeros caracterizados por su baja cohesión. La metodología comprendió ensayos de laboratorio utilizando mezclas de suelo y residuos reciclados en porcentajes del 10 %, 12 % y 15 %, evaluando parámetros de resistencia al corte y compactación. Los resultados indicaron que las mezclas con 12 % de residuos reciclados presentaron una mayor resistencia al corte y una reducción significativa de la permeabilidad, contribuyendo a una mayor estabilidad del terreno. En conclusión, el uso de materiales reciclados permitió mejorar las propiedades geotécnicas de los suelos arenosos costeros, incrementando su estabilidad y capacidad para soportar estructuras residenciales.

Según Torres y López (2018), en la ciudad de Arequipa se realizó una investigación sobre el impacto de los residuos de construcción en el mejoramiento de suelos arenosos de baja densidad característicos de zonas sísmicas, cuyo objetivo fue incrementar la resistencia al corte y cohesión del suelo mediante la incorporación de residuos reciclados. La metodología incluyó ensayos de laboratorio utilizando mezclas con porcentajes de residuos del 5 %, 10 % y 20 %, aplicándose pruebas de corte directo y compresión. Los resultados evidenciaron un incremento significativo en la cohesión y resistencia al corte del suelo con la incorporación de un 10 % de residuos, además de una reducción superior al 20 % en la permeabilidad. En conclusión, el estudio validó la viabilidad del uso de residuos de construcción como material de mejoramiento para suelos arenosos, especialmente en regiones sísmicas donde se requiere mayor estabilidad estructural.

Según Quispe y Huamán (2021), en la ciudad de Cusco se desarrolló un estudio orientado a evaluar la aplicación de residuos de demolición para mejorar la resistencia al corte en suelos arenosos utilizados en proyectos urbanos, cuyo objetivo fue determinar la influencia de dichos residuos en la estabilidad del terreno. La metodología comprendió ensayos de corte directo y compactación en laboratorio, empleando mezclas de suelo y residuos en proporciones del 5 % al 15 %. Los resultados demostraron que la incorporación de un 8 % de residuos incrementó la resistencia al corte en aproximadamente un 25 %, mejorando la capacidad portante y estabilidad del terreno. En conclusión, los residuos de demolición representan una alternativa económica y sostenible para el mejoramiento de suelos arenosos utilizados en proyectos de cimentación urbana.

A nivel regional y local

Según Alarcón y Vásquez (2023), en la provincia de Nazca se realizó una investigación sobre la estabilización de suelos arenosos mediante residuos de demolición, cuyo objetivo fue evaluar la efectividad de estos materiales en el mejoramiento de suelos locales caracterizados por presentar baja cohesión. La metodología incluyó ensayos de laboratorio utilizando mezclas de suelo y residuos en proporciones del 5 %, 10 % y 15 %, evaluando parámetros de resistencia al corte, compresión y permeabilidad. Los resultados indicaron que las mezclas con 10 % de residuos presentaron mejoras significativas en la cohesión, resistencia al corte y capacidad portante del suelo. En conclusión, el uso de residuos de demolición permitió mejorar las propiedades geotécnicas de los suelos arenosos de Nazca, haciéndolos más adecuados para cimentaciones ligeras y medianas.

De acuerdo con Morales y Díaz (2022), en la región de Ica se desarrolló un estudio sobre la utilización de residuos de construcción para mejorar la resistencia de suelos arenosos empleados en cimentaciones, cuyo objetivo fue evaluar el comportamiento del suelo tratado bajo condiciones secas y húmedas propias de la región costera. La metodología comprendió ensayos de compactación y resistencia al corte en mezclas con diferentes porcentajes de residuos de construcción. Los resultados demostraron que la incorporación de un 15 % de residuos incrementó la cohesión y mejoró la capacidad portante del suelo bajo diferentes condiciones climáticas. En conclusión, la utilización de residuos de construcción constituye una alternativa eficiente para mejorar la estabilidad y resistencia de suelos arenosos destinados a cimentaciones residenciales.

Según Salinas y Ramos (2023), en la localidad de Palpa se desarrolló una investigación sobre la estabilización de suelos mediante materiales reciclados, cuyo objetivo fue determinar la influencia de dichos materiales en la resistencia de suelos arenosos de la región. La metodología comprendió ensayos de laboratorio utilizando mezclas con porcentajes de residuos reciclados del 5 %, 10 % y 15 %, evaluando la resistencia al corte y deformabilidad del suelo. Los resultados evidenciaron que la incorporación de un 12 % de materiales reciclados incrementó la estabilidad del suelo y redujo significativamente la deformación bajo cargas estáticas. En conclusión, el empleo de materiales reciclados permitió mejorar las propiedades mecánicas de los suelos arenosos, favoreciendo su aplicación en obras de construcción local.

Según Núñez y Meléndez (2024), en la costa sur del Perú se desarrolló una investigación sobre la aplicación de residuos de demolición en el mejoramiento de suelos arenosos destinados a cimentaciones, cuyo objetivo fue evaluar la influencia de estos residuos en las propiedades geotécnicas del suelo mediante pruebas de laboratorio

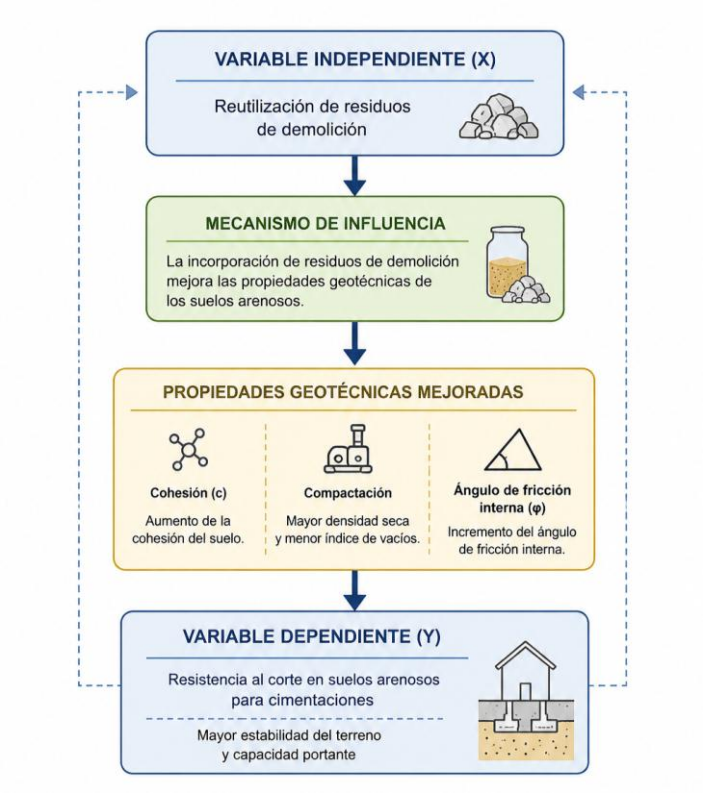
y estudios de campo. La metodología consistió en utilizar mezclas con proporciones de residuos del 5 % al 20 %, evaluando parámetros como resistencia al corte, cohesión y compactación. Los resultados evidenciaron mejoras significativas en la cohesión, compactación y estabilidad del suelo, especialmente en mezclas con 12 % de residuos de demolición. En conclusión, la aplicación de residuos de demolición constituye una alternativa técnica y ambientalmente sostenible para el mejoramiento de suelos arenosos destinados a cimentaciones de bajo costo e impacto ambiental.

3.2. Modelo conceptual de la investigación

El modelo conceptual de la presente investigación establece la relación entre la reutilización de residuos de demolición y la resistencia al corte de suelos arenosos utilizados en cimentaciones. Se plantea que la incorporación de residuos reciclados influye en las propiedades geotécnicas del suelo, incrementando la cohesión, compactación y ángulo de fricción interna, lo cual mejora la estabilidad del terreno y su capacidad portante.

Figura 1.

Diagrama: Modelo conceptual de la investigación



Nota: Adaptado de "Mejoramiento de suelos con residuos de construcción", por J. Pérez (2022), *Revista de Ingeniería Geotécnica, 15*(2), p.

3.3. Bases teóricas

3.3.1. Reutilización de residuos de construcción y demolición en el mejoramiento de suelos arenosos

La reutilización de residuos de construcción y demolición (RCD) constituye una estrategia sostenible orientada al aprovechamiento de materiales reciclables generados durante actividades de construcción, remodelación y demolición de edificaciones e infraestructura. Según Silva et al. (2022), la creciente producción de residuos sólidos provenientes del sector construcción ha generado la necesidad de implementar mecanismos de reutilización que permitan reducir el impacto ambiental y promover el uso eficiente de recursos. En ingeniería geotécnica, los RCD son utilizados como materiales estabilizadores debido a sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales permiten mejorar el comportamiento resistente de suelos con baja capacidad portante.

La incorporación de RCD en suelos arenosos incrementa la densificación, favorece el interbloqueo entre partículas y mejora la resistencia al corte, permitiendo aumentar la estabilidad del terreno frente a cargas estructurales. Asimismo, Terzaghi y Peck (1996) sostienen que los suelos arenosos presentan baja cohesión y elevada permeabilidad, condiciones que limitan el desempeño de cimentaciones superficiales; por ello, la estabilización mediante materiales reciclados representa una alternativa eficiente para incrementar la capacidad de soporte y reducir asentamientos diferenciales.

Figura 2.

Esquema de Reutilización de residuos de construcción y demolición en el mejoramiento de suelos arenosos



Nota: Elaboración propia basada en Arulrajah et al. (2014).

3.3.2. Residuos de Construcción y Demolición (RCD)

Los residuos de construcción y demolición son materiales generados durante procesos constructivos, excavaciones, rehabilitación y demolición de estructuras civiles. Según Poon et al. (2021), estos residuos están compuestos principalmente por concreto reciclado, ladrillos triturados, cerámicos, asfaltos, metales, madera, yeso y materiales

pétreos. Entre ellos, el concreto reciclado y los ladrillos triturados poseen mayor potencial de reutilización geotécnica debido a su resistencia mecánica y textura angular. Desde el punto de vista físico, los RCD presentan propiedades como granulometría variable, elevada rugosidad superficial, densidad media-alta y capacidad de absorción de agua. Mecánicamente, poseen buena resistencia a compresión, capacidad de interbloqueo y comportamiento friccional favorable. Estas características permiten mejorar la compactación y estabilidad de suelos arenosos cuando son incorporados como agregado reciclado. Asimismo, Pacheco et al. (2014) señalan que el uso de RCD favorece la economía circular y reduce la explotación de recursos naturales, contribuyendo a una construcción ambientalmente sostenible.

3.3.3. Composición y propiedades de los RCD utilizables en suelos arenosos

La composición de los residuos de construcción y demolición influye directamente en su comportamiento geotécnico cuando son empleados como material de estabilización. El concreto reciclado presenta elevada resistencia a compresión y buena capacidad de soporte, mientras que los ladrillos triturados aportan mayor fricción y drenaje debido a su textura porosa y angularidad (Katz, 2020). La forma irregular de las partículas recicladas favorece el interbloqueo mecánico, incrementando la estabilidad del suelo tratado. Entre las propiedades físicas más relevantes destacan la granulometría, densidad seca, absorción de agua, porosidad y textura superficial. Desde el punto de vista mecánico, los RCD aportan resistencia al desgaste, incremento de fricción interna y reducción del índice de vacíos del suelo. Huang y Wang (2021) sostienen que la incorporación de partículas recicladas en arenas mejora la compactación y disminuye la susceptibilidad a deformaciones y fallas por corte, debido al aumento del contacto efectivo entre partículas.

3.3.4. Suelos Arenosos y sus características geotécnicas

Los suelos arenosos son materiales granulares conformados predominantemente por partículas minerales de arena, con escasa plasticidad y baja cohesión natural. Según Das (2021), estos suelos presentan alta permeabilidad debido a la presencia de vacíos interconectados, permitiendo un drenaje rápido del agua. Granulométricamente, pueden clasificarse en arena fina, media y gruesa, dependiendo del tamaño de partícula predominante. Entre sus principales propiedades físicas destacan la densidad natural, densidad seca, índice de vacíos, humedad y porosidad. Desde el punto de vista mecánico, los suelos arenosos presentan resistencia al corte dependiente principalmente del ángulo de fricción interna, debido a la ausencia de cohesión significativa. Bowles (2012) señala que estos materiales son susceptibles a asentamientos, deformaciones y pérdida de estabilidad bajo cargas dinámicas o sísmicas, especialmente cuando se encuentran en estado suelto. En regiones sísmicas como Nazca, los suelos arenosos pueden experimentar fenómenos de licuación y pérdida de capacidad portante, afectando la estabilidad de las cimentaciones superficiales.

3.3.5. Resistencia al corte en suelos arenosos

La resistencia al corte representa la capacidad del suelo para resistir esfuerzos tangenciales inducidos por cargas externas sin experimentar fallas estructurales. Según Terzaghi et al. (1996), esta propiedad constituye uno de los parámetros geotécnicos más importantes para el diseño de cimentaciones superficiales. El comportamiento resistente de los suelos se explica mediante el criterio de falla de Mohr-Coulomb, el cual establece que la resistencia al corte depende de la cohesión y del ángulo de fricción interna del material.

$$\tau = c + \sigma \tan\phi$$

Donde: τ = resistencia al corte,

c = cohesión

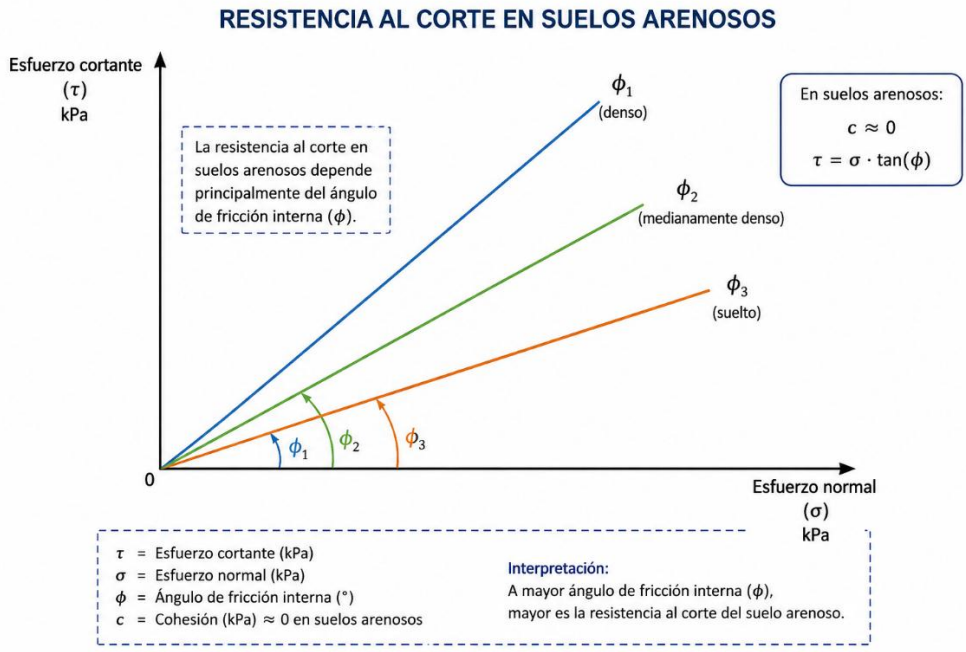
σ = esfuerzo normal efectivo

φ = ángulo de fricción interna

En los suelos arenosos, la cohesión suele ser prácticamente nula, por lo que la resistencia depende principalmente de la fricción entre partículas y del grado de compactación del terreno. Das (2021) señala que factores como densidad relativa, humedad, granulometría y confinamiento influyen directamente en el comportamiento resistente de arenas. Asimismo, la incorporación de materiales reciclados angulares favorece el incremento del interbloqueo y genera cohesión aparente, mejorando significativamente la resistencia al corte.

Figura 3.

Esquema de resistencia al corte en suelos arenosos



Nota: Elaboración propia basada en los principios de resistencia al corte en suelos arenosos y el criterio de falla de Mohr-Coulomb.

3.3.6. Fundamentos de mecánica de suelos aplicados a la estabilidad de suelos arenosos

La mecánica de suelos estudia el comportamiento físico y mecánico de los materiales que conforman el terreno bajo diferentes condiciones de carga. Según Terzaghi (1943), la estabilidad de las cimentaciones depende de la capacidad del suelo para soportar esfuerzos sin presentar fallas por corte o deformaciones excesivas. En

suelos arenosos, la resistencia está controlada principalmente por la fricción interparticular y la densificación del material. Cuando las partículas se encuentran compactadas, aumenta el número de contactos efectivos y se reduce el índice de vacíos, incrementando la capacidad resistente del terreno. Bowles (2012) sostiene que la compacidad del suelo influye directamente en el ángulo de fricción interna y en la capacidad portante de cimentaciones superficiales.

Desde la teoría del estado crítico, la resistencia de arenas densas se relaciona con el fenómeno de dilatancia, el cual genera una resistencia pico superior frente al esfuerzo cortante. Chen et al. (2025) indican que las arenas densas presentan mayor estabilidad debido al incremento de fricción y al interbloqueo entre partículas. Asimismo, la angularidad y textura superficial de materiales reciclados favorecen el comportamiento resistente del suelo estabilizado. Hatefi et al. (2024) señalan que partículas angulares incrementan significativamente la resistencia al corte respecto a materiales redondeados, debido a un mayor grado de fricción y trabazón mecánica.

3.3.7. Capacidad portante en cimentaciones superficiales

La capacidad portante corresponde a la máxima presión que puede soportar el suelo sin experimentar fallas estructurales o asentamientos excesivos. Según Terzaghi y Peck (1996), la capacidad portante depende de parámetros como cohesión, ángulo de fricción interna, peso unitario y profundidad de cimentación. La teoría clásica de Terzaghi establece la siguiente expresión para determinar la capacidad portante última:

$$qu=cNc+\gamma DfNq+0.5\gamma BN\gamma$$

Donde: qu = la capacidad portante última.

c = la cohesión,gamma el peso unitario del suelo.

Df = la profundidad de cimentación.

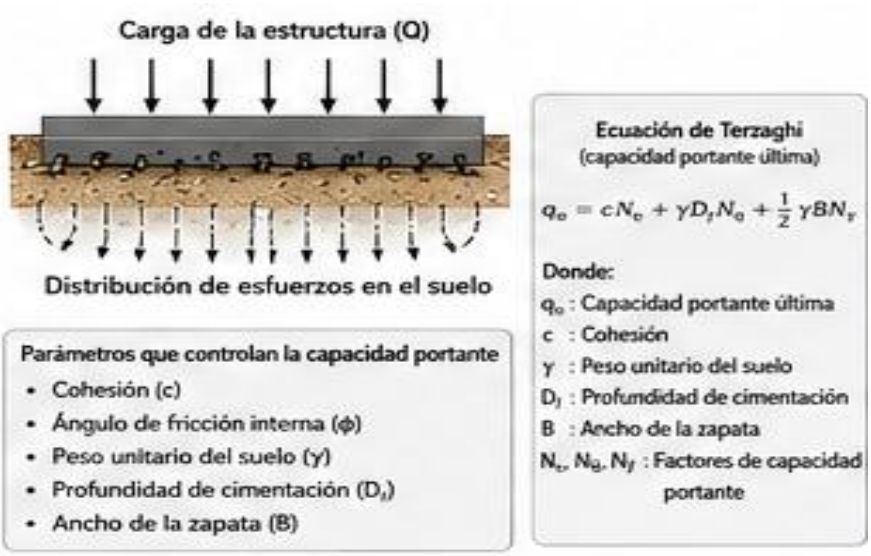
B = el ancho de la zapata.

Nc, Nq y N = gamma los factores de capacidad portante.

En cimentaciones superficiales construidas sobre suelos arenosos, la capacidad de soporte depende principalmente del ángulo de fricción interna y del grado de compactación del terreno. Por ello, cualquier técnica de mejoramiento que incremente estos parámetros permitirá optimizar el desempeño estructural del suelo.

Figura 4.

Esquema de capacidad portante en cimentaciones superficiales



Nota: Adaptado de *Mecánica de suelos en ingeniería práctica*, por Karl von Terzaghi, 1943, Wiley.

3.3.8. Mejoramiento de suelos arenosos mediante RCD

La estabilización de suelos arenosos mediante residuos de construcción y demolición se fundamenta en el incremento de la densificación y del interbloqueo entre partículas. La incorporación de agregados reciclados modifica la estructura interna del suelo, reduciendo vacíos y aumentando la fricción interna del material. Lee y Park (2020) sostienen que la mezcla directa de RCD con suelos arenosos mejora

significativamente la compactación y resistencia al corte. Asimismo, Horpibulsuk et al. (2021) indican que la estabilización química combinada con residuos reciclados incrementa la cohesión y reduce la permeabilidad del suelo. Desde el punto de vista geotécnico, la mejora obtenida depende de factores como granulometría del residuo, porcentaje de incorporación, contenido de humedad y energía de compactación aplicada. Diversas investigaciones recientes demuestran que el uso de RCD incrementa la capacidad portante, reduce deformaciones y mejora la estabilidad de cimentaciones superficiales en terrenos arenosos.

3.3.9. Metodologías de reutilización de residuos de construcción y demolición en el mejoramiento de suelos.

Existen diferentes metodologías para incorporar residuos de construcción y demolición en procesos de estabilización geotécnica de suelos arenosos. Una de las técnicas más utilizadas es la mezcla directa, la cual consiste en combinar el suelo natural con partículas recicladas trituradas mediante procedimientos de homogenización y compactación. Lee y Park (2020) sostienen que este método incrementa la densidad seca y mejora significativamente la resistencia al corte del terreno. Otra metodología corresponde a la estabilización química, donde los residuos reciclados se combinan con agentes estabilizantes como cemento o cal, permitiendo aumentar la cohesión y disminuir la permeabilidad del suelo (Horpibulsuk et al., 2021). Asimismo, la compactación en capas sucesivas constituye una técnica eficiente para incrementar la capacidad portante del terreno, debido a que reduce el índice de vacíos y mejora el interbloqueo entre partículas (Santamarina et al., 2023). La selección de la metodología depende de las propiedades geotécnicas del suelo, tipo de residuo reciclado y condiciones estructurales del proyecto.

3.3.10. Impacto ambiental y sostenibilidad en la reutilización de RCD

La reutilización de residuos de construcción y demolición representa una alternativa sostenible orientada a reducir el impacto ambiental generado por la industria de la construcción. Según la Agencia Europea del Medio Ambiente (2022), el aprovechamiento de materiales reciclados disminuye la extracción de recursos naturales y reduce la emisión de gases de efecto invernadero asociados a la producción de agregados convencionales. Asimismo, Zhou et al. (2021) señalan que la reutilización de RCD puede disminuir considerablemente el volumen de residuos destinados a vertederos y botaderos informales. En el contexto peruano, donde la gestión de residuos de construcción aún presenta limitaciones técnicas y ambientales, la implementación de estrategias de reciclaje y reutilización constituye una alternativa importante para promover prácticas constructivas sostenibles y fomentar la economía circular.

3.3.11. Experiencias previas en la reutilización de RCD para el mejoramiento de suelos

Diversas investigaciones internacionales y nacionales han demostrado la efectividad de los residuos de construcción y demolición en el mejoramiento geotécnico de suelos arenosos. Wang et al. (2020), en China, evidenciaron que la incorporación de agregados reciclados incrementó la resistencia al corte del suelo en aproximadamente un 25 %. Del mismo modo, Rajasekaran y Narasimhan (2022), en India, determinaron que la adición de ladrillos triturados mejoró significativamente la estabilidad de arenas sometidas a cargas dinámicas similares a eventos sísmicos. En Perú, investigaciones desarrolladas en Lima, Trujillo y Nazca han demostrado que la incorporación de residuos reciclados incrementa la cohesión, reduce la permeabilidad y mejora la capacidad portante de suelos arenosos utilizados en cimentaciones superficiales. Estos antecedentes confirman la viabilidad técnica y ambiental de utilizar RCD como material estabilizador en proyectos de ingeniería civil.

3.3.12. Aplicación del mejoramiento de suelos con RCD en la ciudad de Nazca

La ciudad de Nazca presenta características geológicas y sísmicas que condicionan el comportamiento geotécnico de los suelos empleados en cimentaciones. La presencia predominante de suelos arenosos con baja cohesión y elevada permeabilidad genera limitaciones en la capacidad portante y estabilidad estructural de las edificaciones. En este contexto, la reutilización de residuos de construcción y demolición constituye una alternativa eficiente para mejorar las propiedades mecánicas del terreno. Rodríguez y López (2023) sostienen que el análisis de las características granulométricas y resistentes de los residuos reciclados resulta fundamental para garantizar un adecuado desempeño geotécnico en aplicaciones locales. Asimismo, el aprovechamiento de RCD contribuye a reducir la acumulación de residuos de construcción y promueve prácticas sostenibles en el desarrollo urbano de la ciudad.

Figura 5.

Esquema de aplicación del mejoramiento de suelos con RCD en la ciudad de Nazca



Nota: Elaboración propia basándose en los estudios del lugar de trabajo, Nazca.

3.3.13. Relación entre resistencia al corte y cimentaciones superficiales

La resistencia al corte constituye uno de los parámetros geotécnicos más importantes en el diseño de cimentaciones superficiales, debido a que controla la capacidad del suelo para soportar cargas estructurales sin presentar fallas por deslizamiento o deformaciones excesivas. Según Terzaghi y Peck (1996), la capacidad portante de una cimentación depende directamente de la cohesión y del ángulo de fricción interna del suelo. En suelos arenosos, donde la cohesión natural es mínima, la estabilidad del terreno depende principalmente de la fricción entre partículas y del grado de compactación alcanzado. Por ello, cualquier proceso de estabilización que incremente el interbloqueo, densificación y fricción interna del suelo permitirá mejorar el comportamiento resistente del terreno. En cimentaciones superficiales empleadas en viviendas de baja altura, como zapatas aisladas, zapatas corridas y losas de cimentación, el incremento de la resistencia al corte se traduce directamente en una mayor capacidad portante y menor riesgo de asentamientos diferenciales.

Figura 6.

Esquema de relación entre variables e indicadores



Nota. El esquema muestra la relación entre la reutilización de residuos de demolición, representada por la dosificación de ladrillo triturado, y la mejora de la resistencia al corte de los suelos arenosos para cimentaciones, evaluada mediante los indicadores geotécnicos de cohesión, ángulo de fricción interna y densidad seca máxima. Elaboración propia.

3.4. Definición de términos

Residuos de Demolición

Materiales de construcción sobrantes o desechados tras la demolición de edificaciones. Estos pueden incluir concreto, ladrillos, madera, acero y otros componentes. La reutilización de estos materiales busca reducir la cantidad de desechos y aprovechar sus propiedades estructurales (González & Martínez, 2020).

Resistencia al Corte

Capacidad de un suelo para soportar tensiones cortantes antes de fallar. Es una propiedad clave en la ingeniería geotécnica, ya que afecta la estabilidad y seguridad de las cimentaciones (Smith, 2018).

Suelos Arenosos

Tipo de suelo compuesto mayormente por partículas de arena, caracterizado por su alta permeabilidad y baja cohesión. Este tipo de suelo presenta desafíos específicos para las cimentaciones debido a su baja capacidad de carga (López & Ramos, 2021).

Cimentaciones

Parte de la estructura que transfiere las cargas al suelo. En suelos arenosos, la estabilidad de las cimentaciones depende de la mejora de la resistencia al corte del suelo (Peña, 2019).

Estabilización de Suelos

Procedimiento para mejorar las propiedades del suelo mediante la adición de materiales o productos estabilizadores. En este caso, se busca la estabilización del suelo arenoso mediante la adición de residuos de demolición (Torres & Navarro, 2020).

Compactación

Técnica utilizada para aumentar la densidad de un suelo mediante la reducción de espacios vacíos entre partículas. La compactación es fundamental en suelos arenosos para incrementar su resistencia al corte (Méndez, 2017)

Material Reciclado

Residuos que han sido procesados para su reutilización en nuevas aplicaciones. En la tesis, se considera la utilización de residuos de demolición como materiales reciclados para mejorar las propiedades del suelo (García & Flores, 2022).

Propiedades Geotécnicas del Suelo

Características físicas y mecánicas del suelo que influyen en su comportamiento, como la granulometría, la densidad, la cohesión y el ángulo de fricción interna. Estas propiedades son determinantes en la selección de materiales para la mejora del suelo (Pérez, 2018).

Ángulo de Fricción Interna

Parámetro que mide la capacidad de las partículas del suelo para resistir el deslizamiento entre sí. Un aumento en este ángulo indica una mejora en la resistencia al corte del suelo (Jiménez & Valdez, 2021).

Permeabilidad

Capacidad del suelo para permitir el paso del agua a través de sus poros. En suelos arenosos, la alta permeabilidad puede afectar la estabilidad de las cimentaciones y la capacidad de retención de agua (Ortega, 2020).

Normativa Técnica

Conjunto de reglas y estándares que regulan el diseño, la construcción y la utilización de materiales en proyectos de ingeniería. La normativa técnica en esta tesis se relacionará con el uso de materiales reciclados y su aplicación en obras civiles (Rojas, 2019).

Sostenibilidad en la Construcción

Práctica que busca minimizar el impacto ambiental de las actividades de construcción mediante el uso de materiales reciclados, la reducción de residuos y la conservación de recursos naturales. La reutilización de residuos de demolición es una estrategia sostenible en el contexto de la construcción (Fernández & Silva, 2021).

IV. Metodología

4.1. Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que busca solucionar un problema específico mediante la utilización de conocimientos científicos previos. Según Hernández et al. (2014), “la investigación aplicada se orienta a la resolución de problemas prácticos de la realidad a través de la aplicación del conocimiento científico”.

En ese sentido, la investigación se enfoca en la reutilización de residuos de demolición para mejorar la resistencia al corte de los suelos arenosos utilizados en cimentaciones en la ciudad de Nazca durante el año 2025. Asimismo, el alcance de esta aplicación se limita a cimentaciones superficiales o poco profundas empleadas en viviendas de baja altura, de hasta dos o tres niveles como máximo, excluyéndose sistemas de cimentación profunda como pilotes y micropilotes.

4.1.2 Nivel de investigación

La presente investigación corresponde al nivel explicativo, debido a que busca determinar la relación de causa y efecto entre la reutilización de residuos de demolición y la mejora de la resistencia al corte en suelos arenosos empleados en cimentaciones superficiales. Según Hernández et al. (2014), “los estudios explicativos están orientados a explicar por qué ocurre un fenómeno y bajo qué condiciones se manifiesta, estableciendo relaciones de causalidad entre las variables de estudio”.

En ese sentido, la investigación pretende explicar cómo y por qué la incorporación de residuos de demolición influye en las propiedades geotécnicas del suelo arenoso en la ciudad de Nazca durante el año 2025.

4.1.3 Diseño de la investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se basó en la medición objetiva de variables geotécnicas obtenidas mediante ensayos de laboratorio estandarizados, tales como corte directo y Proctor modificado. Según Roberto Hernández Sampieri, Fernández y Baptista (2014), el enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos numéricos y el análisis estadístico para probar hipótesis y establecer patrones de comportamiento entre variables.

Asimismo, el estudio corresponde a un diseño experimental, debido a que la variable independiente, representada por la reutilización de residuos de demolición, fue manipulada deliberadamente mediante la variación controlada de la dosificación de ladrillo triturado en el suelo arenoso (0 %, 5 %, 10 % y 15 %), con el propósito de observar su efecto sobre la variable dependiente, correspondiente a la resistencia al corte del suelo arenoso. Al respecto, Roberto Hernández Sampieri, Fernández y Baptista (2014) señalan que en los diseños experimentales el investigador manipula intencionalmente una o más variables independientes para analizar sus efectos sobre las variables dependientes dentro de condiciones controladas.

De acuerdo con el grado de control de las variables, la investigación se enmarca en un diseño experimental de laboratorio, ya que los ensayos fueron realizados en un ambiente controlado, sin intervención directa en condiciones de campo. No se utilizó un grupo control externo; sin embargo, el suelo natural sin adición de residuos (0 %) fue considerado como condición de referencia para la comparación de resultados. Este diseño permitió evaluar de manera precisa el comportamiento del suelo mejorado y validar las hipótesis planteadas en la investigación.

Finalmente, el comportamiento evaluado corresponde a condiciones representativas para cimentaciones superficiales sometidas a cargas moderadas, propias

de edificaciones residenciales de baja altura. En consecuencia, no se analizaron condiciones asociadas a cargas industriales ni edificaciones de gran altura, debido a que la investigación se centra en viviendas de hasta tres niveles como máximo.

4.2. Ámbito temporal y espacial

4.2.1 Ámbito temporal

La investigación se inició en enero de 2025 con la recolección de muestras y residuos, culminando a finales de julio de 2025 con la fase experimental y el análisis de resultados.

4.2.2 Espacial

La investigación se realizó en la avenida Ramón Castilla, zona sur del distrito de Nazca, y en la calle Juan Matta, zona central del distrito de Nazca.

4.3. Población y muestra

4.3.1 Población

La población estuvo conformada por todos los suelos arenosos aptos para cimentaciones superficiales en la ciudad de Nazca, así como por los residuos de demolición generados, específicamente ladrillos provenientes de actividades de construcción y demolición en dicha ciudad. Estos materiales constituyeron la base de estudio para evaluar el mejoramiento de la resistencia al corte del suelo mediante la incorporación de residuos reciclados.

Según Roberto Hernández Sampieri, Fernández y Baptista (2014), la población es el conjunto total de elementos que poseen características comunes y que son objeto de estudio dentro de una investigación.

4.3.2 Muestra

La muestra estuvo conformada por suelo arenoso apto para cimentaciones superficiales y residuos de demolición de ladrillo recolectados en el distrito de Nazca durante el año 2025. Las muestras fueron obtenidas en la avenida Ramón Castilla, zona sur del distrito de Nazca, y en la calle Juan Matta, zona central del distrito de Nazca.

Se realizaron mezclas con porcentajes de 0 %, 5 %, 10 % y 15 % de ladrillo triturado, las cuales fueron sometidas a ensayos.

La muestra fue seleccionada mediante un muestreo no probabilístico por criterio técnico. Según Roberto Hernández Sampieri, Fernández y Baptista (2014), la muestra es un subgrupo de la población del cual se obtienen los datos para la investigación.

4.4. Instrumentos

Probetas de Suelo:

- Son fundamentales para contener y manejar las muestras de suelo durante el proceso experimental. Se utilizarán probetas específicas para garantizar que las muestras sean representativas y que puedan ser manipuladas con precisión en los ensayos.

Prensa de Corte Directo o Equipo Triaxial:

- El equipo de corte directo permitió aplicar cargas controladas en muestras de suelo, midiendo la resistencia al corte con precisión.
- El equipo triaxial proporcionó información detallada sobre la resistencia del suelo en condiciones controladas de presión y permite evaluar cómo los residuos modifican las propiedades mecánicas del suelo.

Tamices para Análisis Granulométrico:

- Los tamices se utilizaron para determinar la granulometría del suelo antes y después de la inclusión de residuos. Este análisis fue fundamental para evaluar si el material reciclado afecta la estructura del suelo.

Dispositivo de Ensayo de Permeabilidad:

- Para medir la capacidad del suelo de permitir el paso de agua y evaluar cómo la adición de residuos de demolición puede modificar esta propiedad, afectando la estabilidad del suelo.

Software de Análisis de Datos (Excel, SPSS, MATLAB):

- Estos programas se utilizaron para la tabulación y análisis estadístico de los datos obtenidos en los ensayos, permitiendo realizar gráficos, tablas comparativas y análisis de regresión. Con MATLAB, se simularon diferentes escenarios con los datos obtenidos, facilitando la interpretación de resultados.

Tabla 1.

Ensayos realizados y normas ASTM aplicadas

N.º	Ensayo realizado	Parámetro evaluado	Norma ASTM aplicada
1	Análisis granulométrico por tamizado	Distribución del tamaño de partículas del suelo y del residuo de demolición	ASTM **D6913/D6913M** – Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis
2	Ensayo Proctor modificado	Densidad seca máxima y contenido óptimo de humedad	ASTM **D1557** – Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort
3	Ensayo de corte	Cohesión (c) y ángulo de	ASTM **D3080/D3080M** – Standard

directo	fricción interna (φ)	Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions

Nota: Elaboración propia

4.5. Procedimientos

Tipo de residuo de demolición seleccionado

Durante el proceso de caracterización de los residuos de demolición disponibles en la ciudad de Nazca, se identificaron principalmente tres tipos: fragmentos de concreto, piezas cerámicas y restos de ladrillo. Tras una evaluación comparativa, se optó por utilizar residuos de ladrillo debido a diversas razones técnicas y científicas.

En primer lugar, los ladrillos presentan una estructura porosa y una granulometría favorable que permite una mejor interacción con suelos de tipo arenoso, facilitando el entrelazado de partículas y aumentando la fricción interna, lo cual es un factor determinante para mejorar la resistencia al corte. Además, estudios previos han demostrado que los agregados reciclados provenientes de ladrillo triturado mejoran significativamente parámetros como la cohesión aparente y el ángulo de fricción interna en suelos de baja cohesión.

Por otro lado, desde una perspectiva de sostenibilidad y viabilidad, los residuos de ladrillo fueron los más abundantes y accesibles en la zona de estudio, lo cual garantiza la replicabilidad del método propuesto y reduce los costos operativos del tratamiento del suelo. Asimismo, su mayor facilidad de trituración y distribución uniforme en las mezclas permite una dosificación más precisa y homogénea.

En conjunto, la selección del ladrillo como residuo de demolición para la mejora de suelos arenosos se justifica no solo por su comportamiento mecánico favorable

reportado en la literatura especializada, sino también por su disponibilidad local, facilidad de procesamiento y compatibilidad geotécnica con los objetivos de esta investigación. En la figura 7 se muestra la zona en donde se encontró los residuos de demolición.

Figura 7.

Ubicación de la zona de extracción de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 8.

Ubicación de la zona de muestreo.



Nota: Elaboración propia

Para el desarrollo de la presente investigación, se realizó la recolección de tres muestras de residuos de demolición compuestas exclusivamente por fragmentos de ladrillo. La recolección se llevó a cabo el día 6 de mayo, durante las horas de la mañana, la figura 8 muestra la ubicación del punto de muestreo, con el propósito de obtener un material representativo de la zona. Cada muestra tuvo un peso aproximado entre 25 kg y 32 kg, y fue trasladada cuidadosamente para su posterior procesamiento y análisis en laboratorio. Esta selección responde a criterios técnicos que consideran la disponibilidad local del material, su facilidad de manipulación y sus propiedades geotécnicas adecuadas para el mejoramiento de suelos arenosos en aplicaciones de cimentación.

El mismo día 6 de mayo, durante las horas de la mañana, se procedió también a la recolección de tres muestras de suelo arenoso en distintos puntos de la ciudad de Nazca, con el objetivo de contar con material representativo de las condiciones

geotécnicas locales. La extracción se realizó mediante calicatas de dimensiones 1.00 x 1.00 x 1.20 metros de profundidad. Cada muestra fue almacenada en sacos individuales, con un peso que osciló entre 10 kg y 14 kg, tal como se observa en la imagen correspondiente. Estas muestras fueron trasladadas con cuidado para su posterior análisis y ensayos en laboratorio, en el marco del estudio sobre la mejora de su resistencia al corte mediante la incorporación de residuos de ladrillo triturado.

Figura 9.

Muestras de suelo arenoso



Nota: Elaboración propia

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, experimental y aplicado, ejecutado en entornos de laboratorio con control de variables. Se recolectaron muestras de suelo arenoso representativo de la ciudad de Nazca, así como residuos de demolición, principalmente ladrillo cocido, extraídos de construcciones demolidas. Los materiales fueron acondicionados y sometidos a una serie de ensayos de laboratorio para evaluar su comportamiento mecánico y determinar

la mejora de la resistencia al corte del suelo al ser mezclado con proporciones específicas de residuos.

El procedimiento experimental fue dividido por tipo de ensayo:

Ensayo de Granulometría

Se inició el proceso con la caracterización del suelo y del residuo de demolición (ladrillo triturado) mediante el ensayo granulométrico por tamizado.

- Se secaron las muestras a 110 °C por 24 horas en una estufa de laboratorio.
- Se pesaron 500 g de muestra seca de suelo natural y de ladrillo triturado por separado.
- Las muestras fueron sometidas a un tamizado mecánico con una columna de mallas (3/8", N°4, N°10, N°40, N°200).
- Se calculó el porcentaje que pasaba por cada tamiz, elaborando las curvas granulométricas correspondientes.
- Este procedimiento permitió clasificar ambos materiales según el sistema SUCS y determinar su compatibilidad para mezclas.

Figura 10.

Ladrillo cocido molido, residuo de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 11.

Insertado de muestra al horno a 110°C



Nota: Elaboración propia

Figura 12.

Preparación de muestras y tamices - Ensayo granulométrico



Nota : Elaboración propia

Figura 13.

Tamices



Nota : Elaboración propia

Preparación de mezclas suelo – ladrillo triturado

- Se establecieron cinco proporciones de mezcla en peso: 0 % (control), 5 %, 10 %, 15 % y 20 % de ladrillo triturado respecto al suelo seco.
- El ladrillo fue previamente triturado con martillo de impacto y tamizado para garantizar que su granulometría fuese menor a 3/8".
- Las mezclas fueron homogeneizadas en seco manualmente, y luego se les añadió agua hasta alcanzar condiciones de humedad óptima establecida mediante ensayo Proctor modificado.

Ensayo Proctor Modificado

Este ensayo se realizó con el objetivo de determinar la humedad óptima y la densidad seca máxima de las diferentes mezclas suelo-residuo.

- Se utilizó un molde cilíndrico estándar con un volumen de 1/30 pie³, un pisón de 10 lb y una altura de caída de 18".
- Se compactaron cinco capas de suelo, golpeando cada capa 25 veces.
- Se realizaron ensayos para cada porcentaje de mezcla (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %).
- Se obtuvo la curva de compactación de cada muestra, determinando los valores de γdmax y Wopt.
- Los datos permitieron observar el efecto del residuo sobre la capacidad de compactación del suelo arenoso.

Figura 14.

Investigador apisonando muestra para ensayo de Proctor modificado



Nota: Elaboración propia

Ensayo de Corte Directo

Con el objetivo de analizar la mejora en la resistencia al corte, se utilizó la celda de corte directo en muestras compactadas a la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor.

- Las muestras fueron colocadas en la caja de corte de dimensiones estándar (60 mm x 60 mm).
- Se aplicaron tres niveles de carga normal: 0.5 kg/cm², 1.0 kg/cm² y 1.5 kg/cm².
- El ensayo se llevó a cabo a una velocidad de deformación constante (1 mm/min).
- Se registraron los valores de fuerza cortante máxima, generando la envolvente de falla de Coulomb.
- Se determinaron los parámetros de resistencia: ángulo de fricción interna (φ) y cohesión (c) para cada mezcla.

Figura 15.

Ensayo de corte directo - Equipo

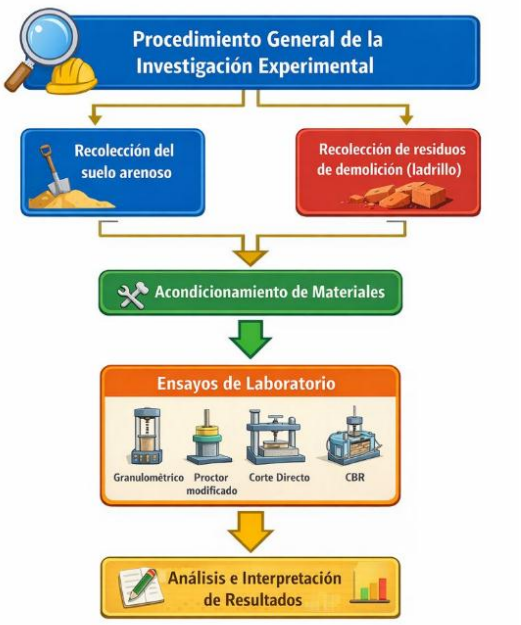


Nota: Elaboración propia

Diagramas de flujo del procedimiento experimental

Figura 16.

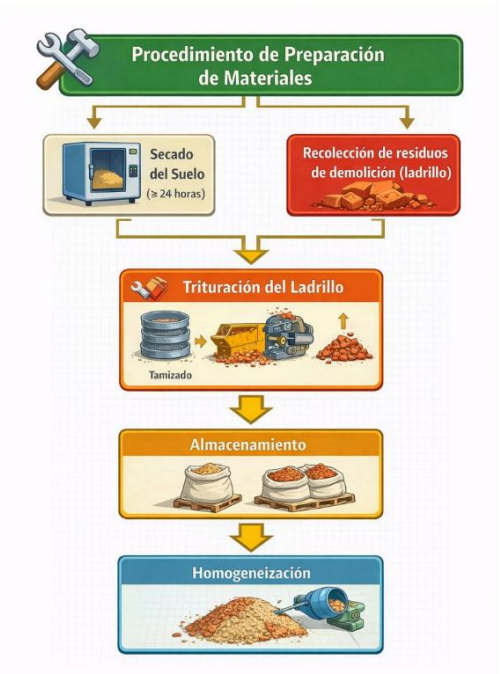
Diagrama de flujo del procedimiento general de la investigación



Nota: Elaboración propia

Figura 17.

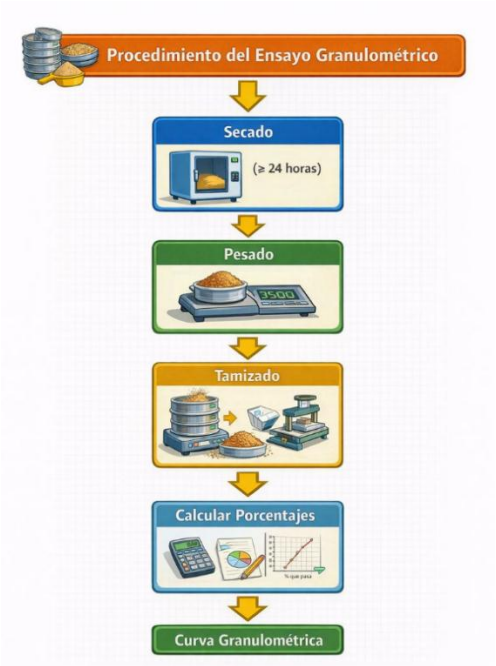
Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de materiales



Nota: Elaboración propia

Figura 18.

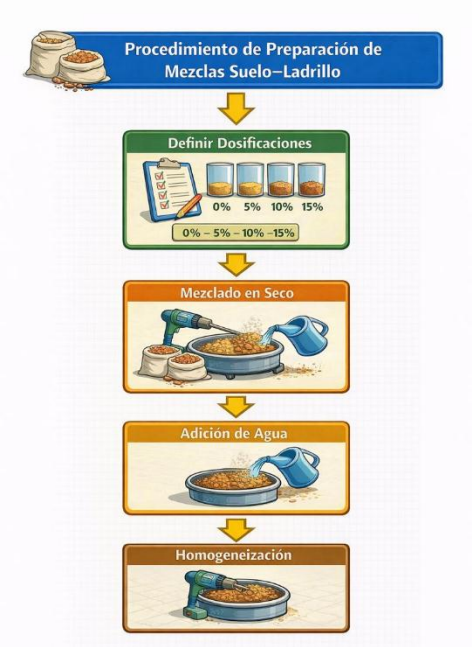
Diagrama de flujo del procedimiento del ensayo granulométrico



Nota: Elaboración propia

Figura 19.

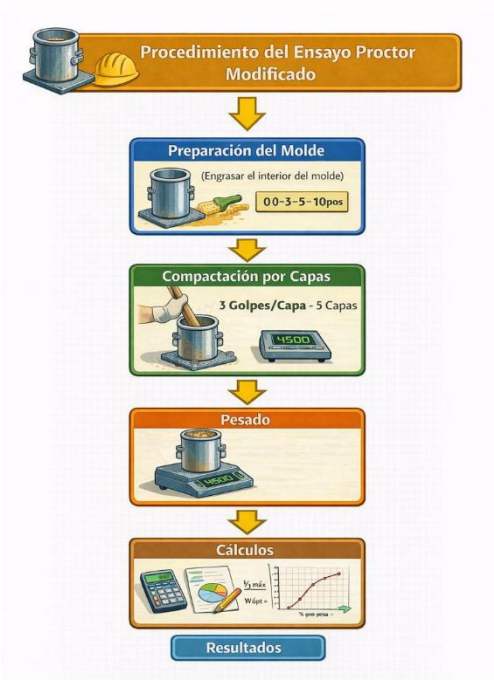
Diagrama de flujo del procedimiento de preparación de mezclas suelo - ladrillo



Nota: Elaboración propia

Figura 1.

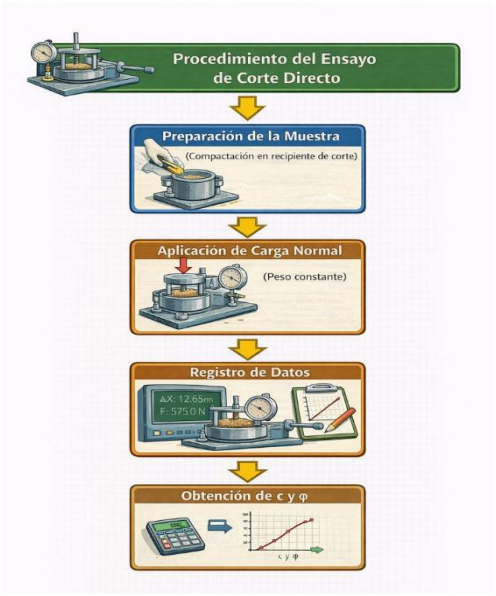
Diagrama de flujo del procedimiento del ensayo de Proctor modificado



Nota: Elaboración propia

Figura 21.

Diagrama de flujo del procedimiento de ensayo de Corte directo



Nota: Elaboración propia

4.6. Análisis de datos

El análisis de datos de esta investigación se llevó a cabo de manera cuantitativa, con base en los resultados obtenidos durante la fase experimental. Para ello, se organizaron y procesaron los datos mediante hojas de cálculo y herramientas estadísticas básicas, permitiendo interpretar con precisión el comportamiento de las mezclas de suelo arenoso con residuos de demolición, específicamente ladrillo triturado. A continuación, se describen los procedimientos y conclusiones obtenidas en cada etapa de ensayo.

En primer lugar, se analizó la granulometría tanto del suelo natural como del ladrillo triturado. Este análisis permitió conocer la distribución de tamaños de partículas mediante el porcentaje de material que pasaba por cada tamiz. Los resultados se representaron mediante curvas granulométricas, las cuales facilitaron clasificar los materiales y determinar su compatibilidad. De esta forma, se verificó que el ladrillo

triturado presentaba una granulometría compatible con el suelo arenoso, lo que permitió su incorporación como un material complementario en la mezcla.

En la segunda etapa, se realizó el análisis de los resultados del ensayo Proctor modificado. En este caso, se evaluó el comportamiento de las diferentes mezclas del suelo con ladrillo triturado en proporciones de cero, cinco, diez, quince y veinte por ciento. Para cada muestra se obtuvo el valor de humedad con la que se lograba la máxima compactación, así como la densidad seca alcanzada. Estos resultados se analizaron mediante la comparación directa de los valores de densidad seca máxima y humedad óptima, observando en qué medida la adición del residuo de demolición influía en la capacidad del suelo para ser compactado. En general, se pudo evidenciar que ciertas proporciones de ladrillo triturado mejoraron la compacidad del suelo, destacándose aquellas con diez y quince por ciento de adición.

Posteriormente, se analizaron los resultados del ensayo de corte directo, el cual permitió evaluar la resistencia al esfuerzo cortante de las distintas mezclas. Para ello, se sometieron las muestras a tres niveles de carga, y se registraron los valores máximos de resistencia obtenidos. A partir de estos datos, se determinaron los parámetros fundamentales que definen el comportamiento del suelo ante esfuerzos cortantes, como la cohesión y la fricción interna. El análisis reveló que la incorporación de residuos de ladrillo generó una mejora progresiva en la resistencia del suelo, siendo más notable en las mezclas con diez y quince por ciento, las cuales presentaron mayores valores en los parámetros analizados.

Finalmente, se realizó una comparación integral entre los distintos resultados de los ensayos. Se cruzaron los datos de compactación, resistencia al corte y capacidad de soporte, con el propósito de identificar la mezcla que ofrecía el mejor desempeño

general. De esta comparación se concluyó que la mezcla con quince por ciento de ladrillo triturado era la que presentaba los valores más altos en términos de resistencia y estabilidad, sin afectar negativamente la trabajabilidad del material. Esta mezcla fue identificada como la óptima para su uso en cimentaciones sobre suelos arenosos, bajo condiciones similares a las de la ciudad de Nazca.

En complemento al análisis experimental descrito, los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo e inferencial, con la finalidad de interpretar de manera objetiva el comportamiento de las diferentes mezclas de suelo arenoso con residuos de demolición. La estadística descriptiva permitió resumir la información mediante valores representativos como promedios y tendencias observadas en los resultados de densidad seca máxima, cohesión, ángulo de fricción interna, facilitando la comparación preliminar entre las distintas dosificaciones de ladrillo triturado.

Asimismo, con el propósito de determinar si las diferencias observadas entre las mezclas eran estadísticamente significativas, se aplicó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor. Este análisis permitió evaluar la influencia de la dosificación del residuo de demolición sobre las propiedades geotécnicas del suelo, contrastando la hipótesis nula de igualdad de medias frente a la hipótesis alternativa de existencia de diferencias significativas entre los tratamientos. El nivel de significancia adoptado para la toma de decisiones fue del 5 % ($\alpha = 0,05$).

Cuando el análisis ANOVA evidenció la existencia de diferencias estadísticamente significativas, se aplicó la prueba post hoc de Tukey, con el fin de identificar específicamente entre qué grupos de dosificación se presentaban dichas diferencias. Esta prueba permitió comparar de manera múltiple las medias de los

distintos porcentajes de ladrillo triturado, determinando cuál de las mezclas presentaba un desempeño superior en términos de resistencia al corte, compactación y capacidad de soporte.

La aplicación conjunta de la estadística descriptiva y del análisis inferencial permitió sustentar cuantitativamente la selección de la dosificación óptima de residuo de demolición. En este sentido, los resultados estadísticos respaldaron que la mezcla con quince por ciento de ladrillo triturado presentó mejoras significativas respecto al suelo natural y a otras dosificaciones, validando experimentalmente las hipótesis planteadas y reforzando la confiabilidad de las conclusiones obtenidas para su aplicación en cimentaciones sobre suelos arenosos en la ciudad de Nazca.

Los resultados fueron interpretados considerando su aplicabilidad en cimentaciones superficiales para viviendas de baja altura, relacionando los parámetros de resistencia obtenidos con la capacidad portante estimada del terreno.

4.7. Consideraciones éticas

Durante el desarrollo de la presente investigación se respetaron en todo momento los principios éticos fundamentales que rigen el quehacer científico, garantizando la integridad del proceso, la transparencia en los resultados y el respeto al entorno y a las personas involucradas de forma directa o indirecta.

En primer lugar, se aseguró que la recolección de muestras de suelo y residuos de demolición se realizara con autorización previa y sin afectar áreas protegidas, zonas residenciales activas ni patrimonio cultural. Los residuos empleados provenían de edificaciones previamente demolidas de forma legal, por lo que su uso no representó ningún riesgo para la seguridad de personas ni para el medio ambiente.

Asimismo, se procuró minimizar la generación de desechos durante el trabajo de laboratorio, reutilizando materiales en la medida de lo posible y disponiendo adecuadamente los sobrantes, de acuerdo con las normas de gestión ambiental vigentes.

En cuanto a la integridad académica, se garantizó que toda la información utilizada en el desarrollo del marco teórico, antecedentes y discusión de resultados provino de fuentes debidamente citadas y referenciadas conforme a las normas del estilo APA séptima edición. No se incurrió en plagio, alteración de datos ni manipulación intencional de resultados. Todos los datos presentados fueron obtenidos de forma objetiva a partir de procedimientos técnicos reconocidos y documentados.

Finalmente, el trabajo se desarrolló sin vulnerar los derechos de autor, de propiedad intelectual ni la privacidad de terceros. En caso de requerirse asesoría o apoyo técnico, se reconoció debidamente la colaboración de los profesionales o instituciones participantes. La investigación fue realizada con responsabilidad y compromiso ético, contribuyendo de manera honesta al avance del conocimiento en el campo de la ingeniería civil y la sostenibilidad en la construcción.

Validez de los instrumentos

La validez de los instrumentos utilizados en la presente investigación se sustenta en el empleo de ensayos geotécnicos estandarizados y reconocidos internacionalmente, los cuales permiten medir de manera directa y objetiva las variables de estudio. Los ensayos de corte directo, Proctor modificado. cuentan con procedimientos normalizados establecidos por normas técnicas internacionales, lo que garantiza que los parámetros obtenidos, como cohesión, ángulo de fricción interna, densidad seca máxima y capacidad de soporte, representen adecuadamente el comportamiento real del suelo arenoso.

Asimismo, la validez de contenido se asegura debido a que cada instrumento empleado mide específicamente los indicadores definidos en la matriz de operacionalización de variables, manteniendo coherencia entre los objetivos, las hipótesis y los resultados de la investigación. De este modo, los instrumentos utilizados son pertinentes y adecuados para evaluar la influencia de la reutilización de residuos de demolición en la resistencia al corte de los suelos arenosos para cimentaciones.

Confiabilidad de los instrumentos

La confiabilidad de los instrumentos se garantizó mediante la repetición controlada de los ensayos de laboratorio y la aplicación de procedimientos uniformes en todas las muestras analizadas. Cada prueba fue ejecutada bajo las mismas condiciones de preparación, compactación, carga y velocidad de ensayo, reduciendo la posibilidad de errores sistemáticos y variaciones no controladas.

Adicionalmente, la confiabilidad se reforzó mediante la calibración previa del equipo de laboratorio, así como el uso de instrumentos en adecuado estado de funcionamiento. El empleo de métodos normalizados y la consistencia en la obtención de resultados comparables entre las diferentes dosificaciones del residuo de demolición permiten afirmar que los datos obtenidos son reproducibles y confiables, respaldando la solidez de los resultados experimentales.

V. Resultados y discusión

5.1. Resultados

Ensayo de granulometría

Tabla 2.

Resultados del ensayo granulométrico a diferentes porcentajes de adición de residuos de demolición (ladrillos)

Muestra	**% Grava(> Nº 4)**	**% Arena(Nº 4 – Nº 200)**	**% Finos(< Nº 200)**	**Tamaño máx. absoluto**	**Tamaño máx. relativo**	**Clasificación SUCS**	**Clasificación AASHTO**
Suelo + 0% ladrillo molido	0.00%	92.33%	7.67%	2"	1½"	SP-SM	A-2-4
Suelo + 5% ladrillo molido	0.00%	89.99%	11.10%	2"	1½"	SP-SM	A-2-4
Suelo + 10% ladrillo molido	0.00%	84.27%	15.73%	2"	1½"	SM	A-2-4
Suelo + 15% ladrillo molido	0.00%	83.08%	16.92%	2"	1½"	SM	A-2-4

Nota. La tabla presentada resume los principales resultados del análisis granulométrico realizado sobre cuatro muestras de suelo arenoso con distintas proporciones de adición de ladrillo molido: 0 %, 5 %, 10 % y 15 %. En ella se detallan los porcentajes de grava, arena y finos presentes en cada muestra, así como los tamaños máximos absoluto y relativo determinados a partir de los tamices utilizados, además de la clasificación del suelo según los sistemas SUCS (Unified Soil Classification System) y AASHTO.

Los resultados obtenidos fueron analizados considerando su aplicabilidad en cimentaciones superficiales, particularmente en viviendas de hasta dos o tres pisos como

máximo, donde la resistencia al corte del suelo constituye el parámetro determinante para la estabilidad estructural.

El porcentaje de grava corresponde al material retenido en el tamiz Nº 4, mientras que el porcentaje de arena se refiere al material que pasa por dicho tamiz pero es retenido por el tamiz Nº 200. Por su parte, los finos son las partículas que logran pasar el tamiz Nº 200. El tamaño máximo absoluto representa el mayor tamaño de partícula presente en la muestra, identificado como el tamiz de mayor abertura por el que pasa el 100 % del material, siendo este de 2 pulgadas. El tamaño máximo relativo corresponde al tamiz inmediatamente inferior por el cual también pasa la totalidad del material, determinado como el tamiz de 1½ pulgadas.

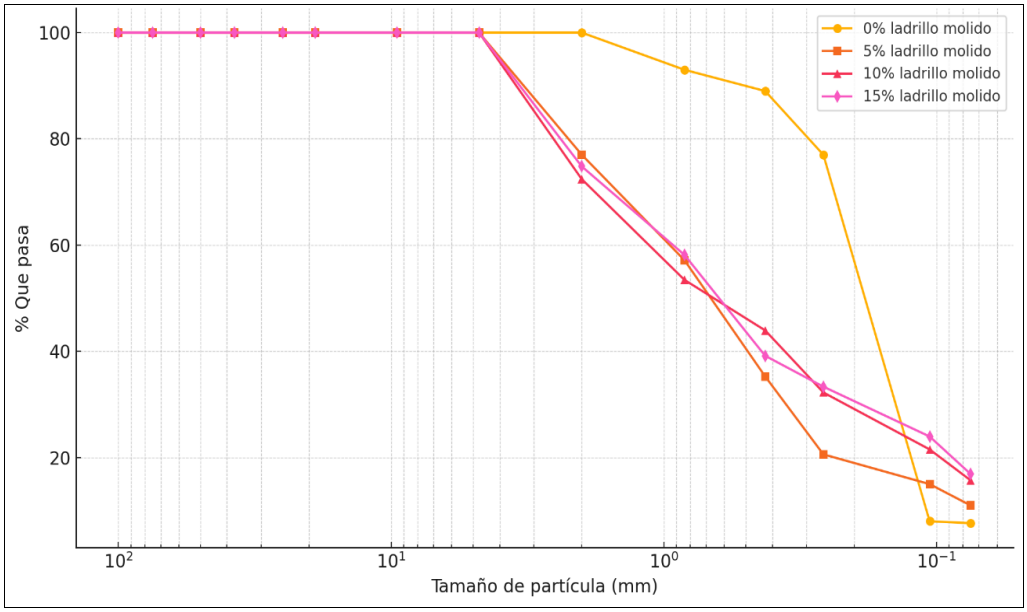
En todas las muestras analizadas se observa una ausencia total de grava, lo cual confirma que el suelo base es predominantemente arenoso. A medida que se incrementa la proporción de ladrillo molido en la mezcla, se evidencia un aumento progresivo del contenido de finos, que pasa de 7.67 % en la muestra sin adición hasta 16.92 % en la mezcla con 15 % de ladrillo. Esta variación en la fracción fina tiene un impacto directo en la clasificación del suelo. Según el sistema SUCS, las dos primeras muestras (0 % y 5 % de ladrillo) se clasifican como SP-SM, es decir, arena mal graduada con contenido bajo de finos no plásticos. En cambio, al superar el umbral del 12 % de finos, las muestras con 10 % y 15 % de ladrillo se clasifican como SM, correspondientes a una arena limosa. En cuanto a la clasificación AASHTO, todas las muestras se ubican dentro del grupo A-2-4, característico de suelos arenosos con presencia moderada de finos no plásticos o de baja plasticidad.

El análisis conjunto de estos resultados permite interpretar que el incremento de material fino, derivado del ladrillo molido, podría modificar el comportamiento del suelo en aspectos clave como la compacidad, la permeabilidad y la resistencia al corte.

Este comportamiento progresivo sugiere que, si bien el suelo base es netamente granular, su interacción con un residuo cerámico molido puede favorecer su uso en aplicaciones específicas de la ingeniería geotécnica, como la mejora de subrasantes, la estabilización de suelos o el diseño de capas estructurales, siempre y cuando se controle adecuadamente la dosificación del material reciclado.

Figura 22.

Curvas granulométricas comparativas



Nota. La gráfica presentada muestra las curvas granulométricas correspondientes a las cuatro mezclas analizadas: suelo arenoso natural y suelo con adición de ladrillo molido en proporciones de 5 %, 10 % y 15 %. En el eje horizontal, representado en escala logarítmica, se indican los tamaños de partícula en milímetros según la abertura de los tamices utilizados; mientras que en el eje vertical se presenta el porcentaje que pasa acumulado para cada fracción.

Se observa que todas las mezclas tienen un paso completo a través de los tamices más gruesos, lo que confirma la ausencia de partículas de grava en las muestras. A partir del tamiz N.º 10 (2 mm) comienzan a apreciarse diferencias entre las curvas,

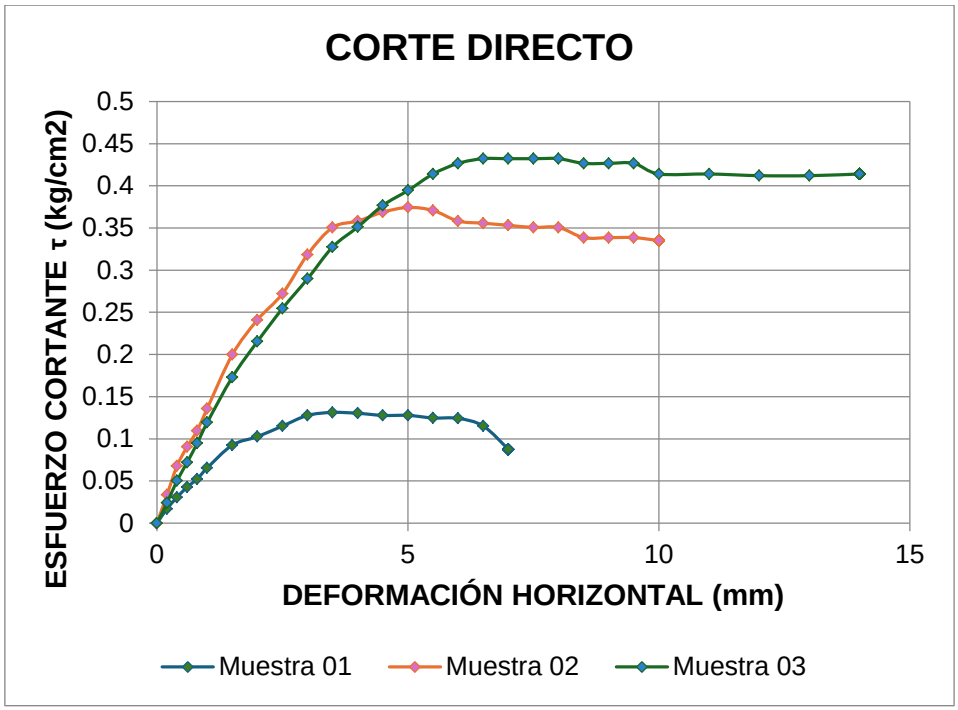
reflejando la variación en la distribución granulométrica a medida que se incrementa el contenido de ladrillo molido. Las curvas correspondientes a las mezclas con mayor adición de este material tienden a desplazarse hacia valores menores de porcentaje que pasa, lo cual indica un mayor contenido de finos en la mezcla.

Esta representación visual permite identificar cómo la incorporación progresiva de ladrillo molido modifica la composición granulométrica del suelo, disminuyendo la fracción arenosa y aumentando la presencia de partículas finas. Esta información es crucial para la interpretación del comportamiento mecánico del material, así como para su clasificación en los sistemas SUCS y AASHTO, tal como se detalló previamente en el análisis técnico. En conjunto, la gráfica respalda los resultados obtenidos en laboratorio y permite una mejor comprensión del efecto del material reciclado en la estructura del suelo tratado.

Ensayo de corte directo

Figura 23.

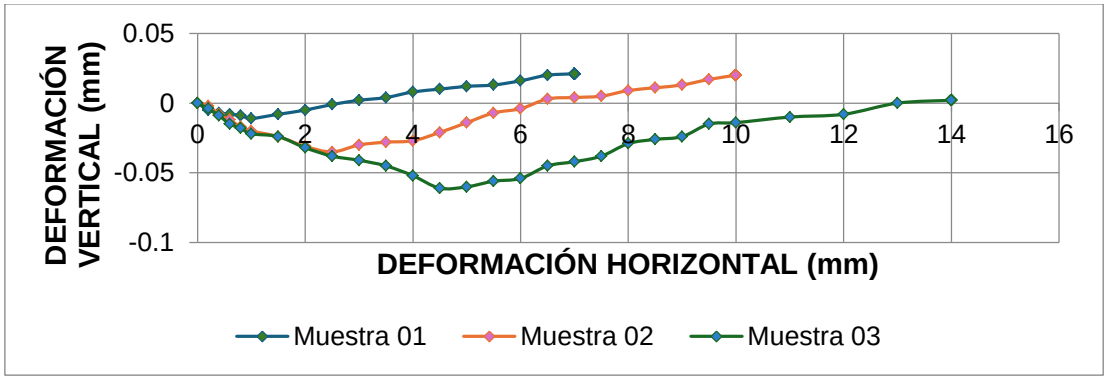
Resultados del ensayo corte directo, muestras de suelo arenoso + 0% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 24.

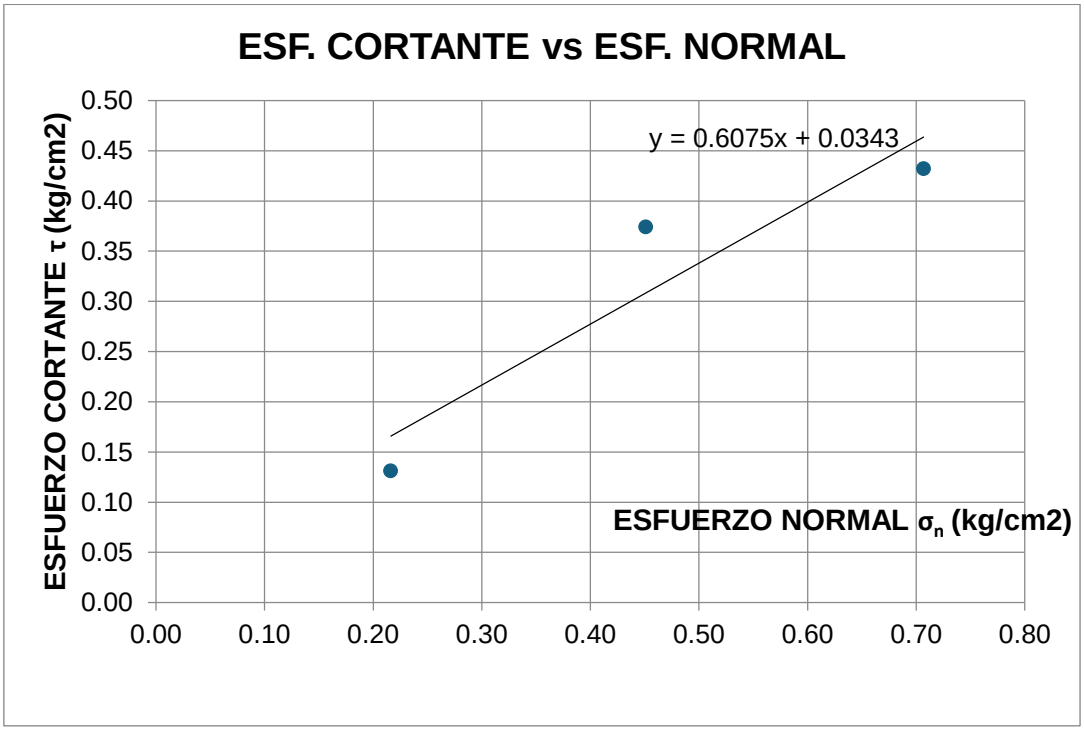
Deformación horizontal y vertical, muestras de suelo arenoso + 0% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 25.

Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 0% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Tabla 3.

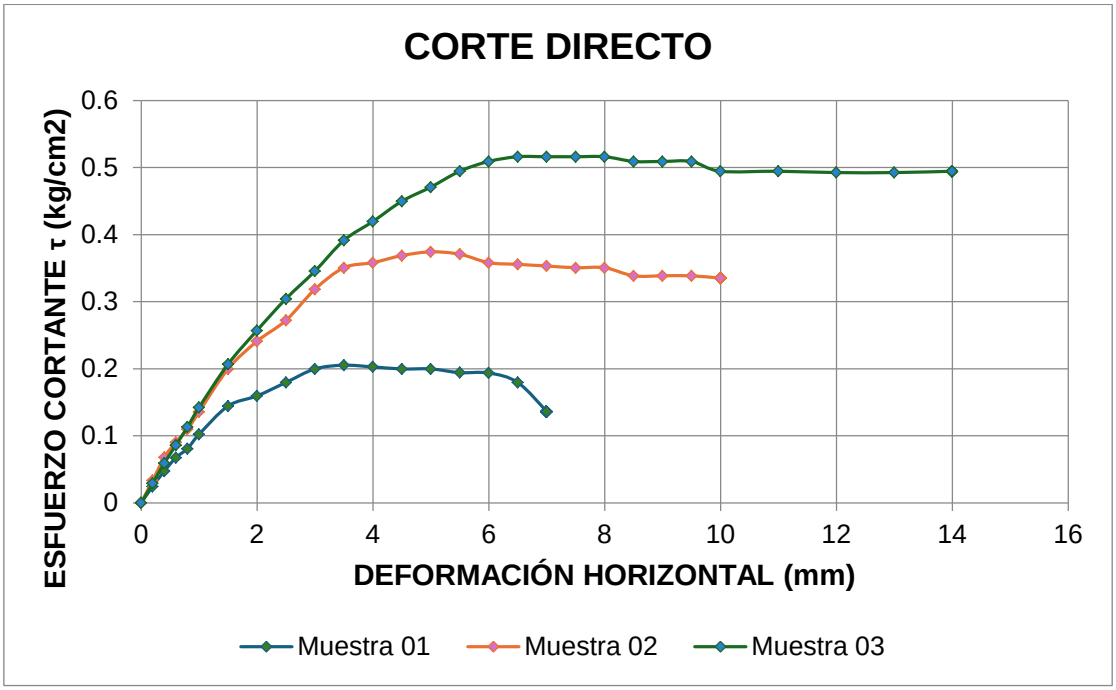
Cuadro resumen de resultados del ensayo de corte directo, muestras de suelo arenoso + 0% de residuos de demolición

Muestras	**M-01**	**M-02**	**M-03**
Carga Vertical (kg)	4.00	8.00	12.00
Área en Corte (cm2)	18.49	17.73	16.98
σ_n (kg/cm2)	0.22	0.45	0.71
τ (kg/cm2)	0.13	0.37	0.43
	Cohesión =	0.03 kg/cm2	
	Ángulo de fricción interna =	31° 16' 47"	

Nota: Elaboración propia

Figura 26.

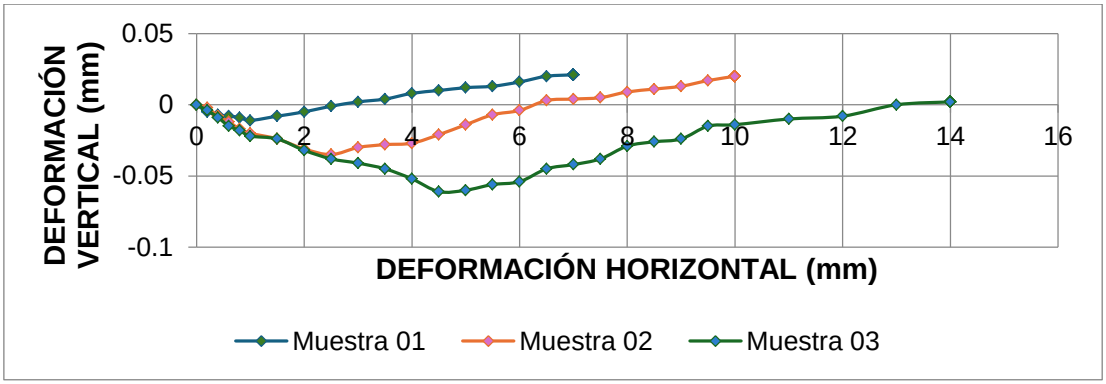
Resultados del ensayo corte directo, muestras de suelo arenoso + 5% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 27.

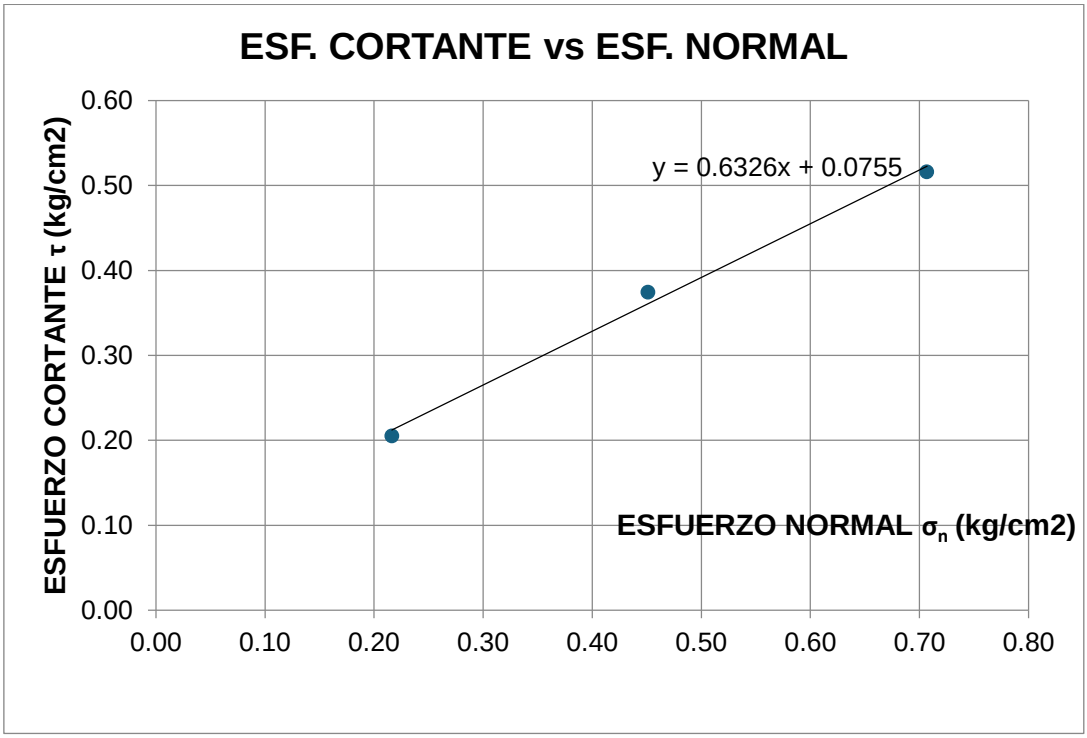
Deformación horizontal y vertical, muestras de suelo arenoso + 5% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 28.

Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 5% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Tabla 4.

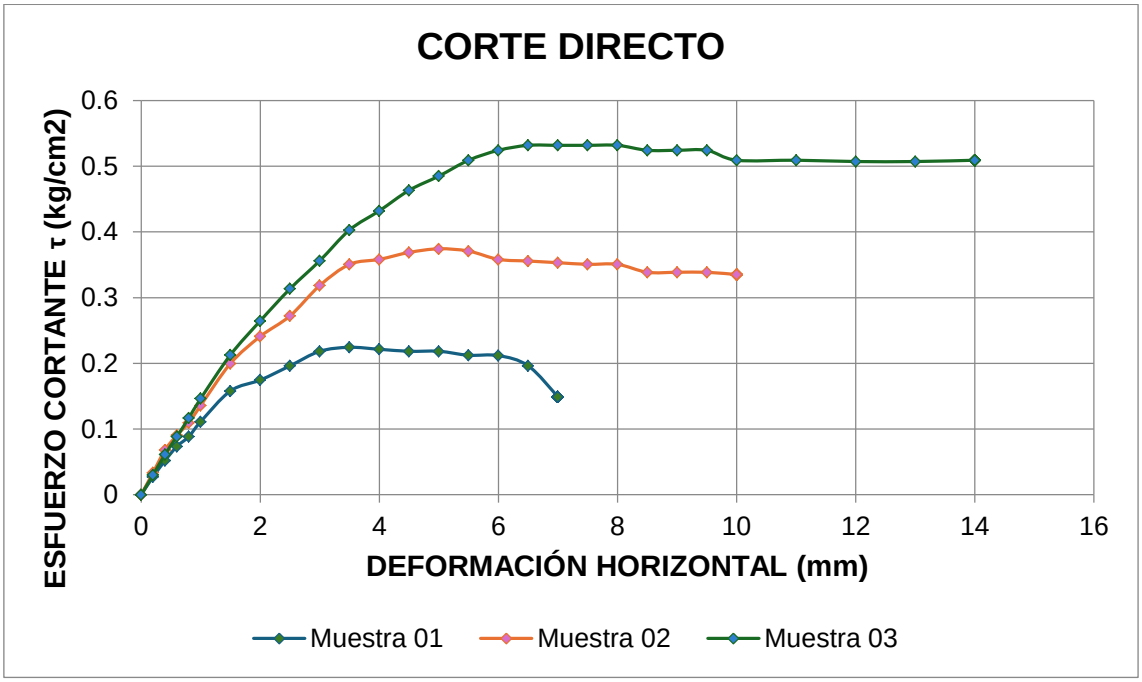
Cuadro resumen de resultados del ensayo de corte directo, muestras de suelo arenoso + 5% de residuos de demolición

Muestras	**M-01**	**M-02**	**M-03**
Carga Vertical (kg)	4.00	8.00	12.00
Área en Corte (cm2)	18.49	17.73	16.98
σ_n (kg/cm2)	0.22	0.45	0.71
τ (kg/cm2)	0.21	0.37	0.52
Cohesión =	0.08 kg/cm2		
Ángulo de fricción interna =	32° 19' 02"		

Nota: Elaboración propia

Figura 29.

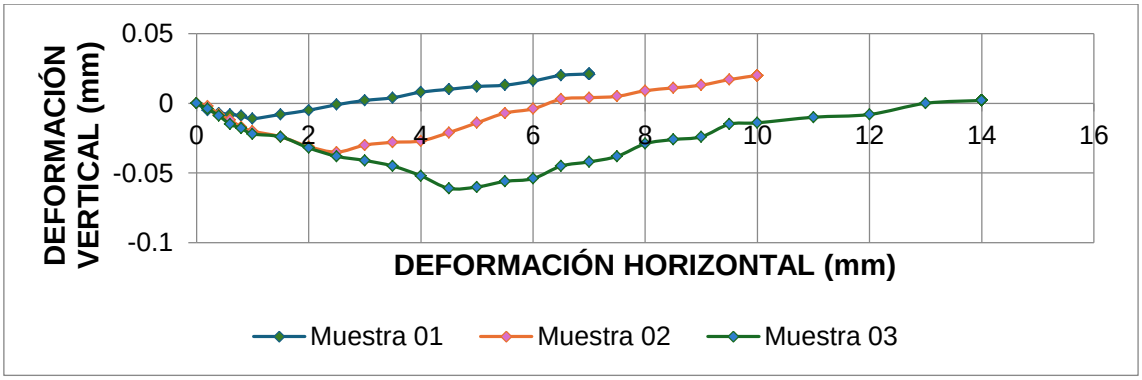
Resultados del ensayo corte directo, muestras de suelo arenoso + 10% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 30.

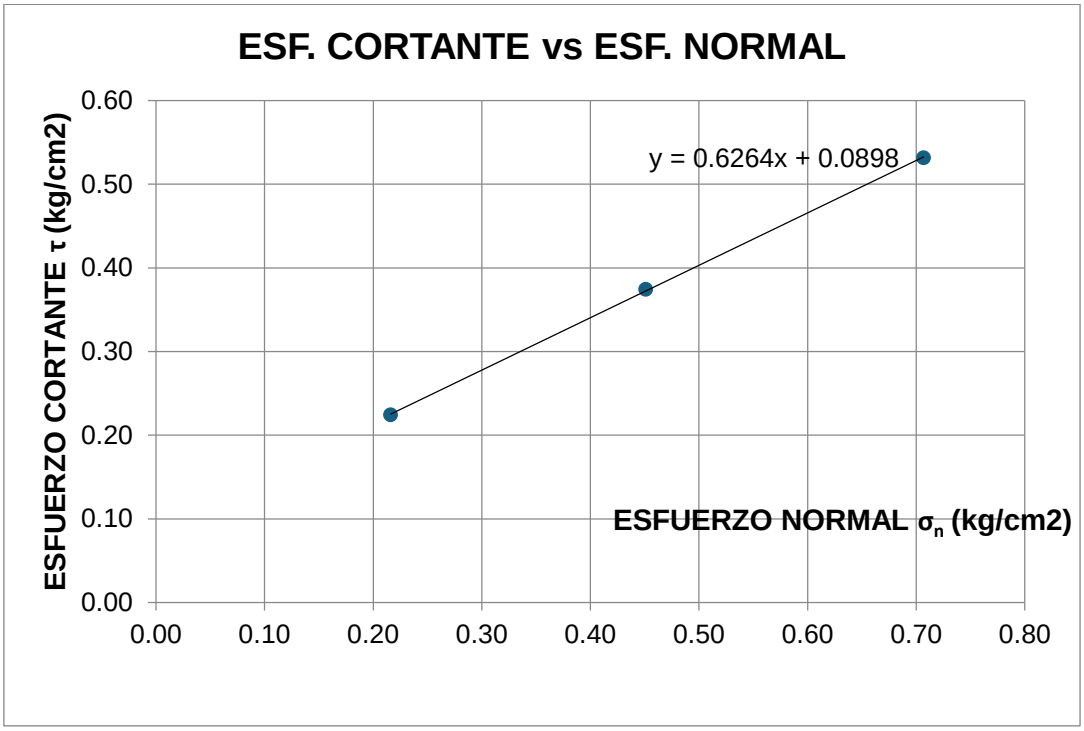
Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 10% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 31.

Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 10% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Tabla 5.

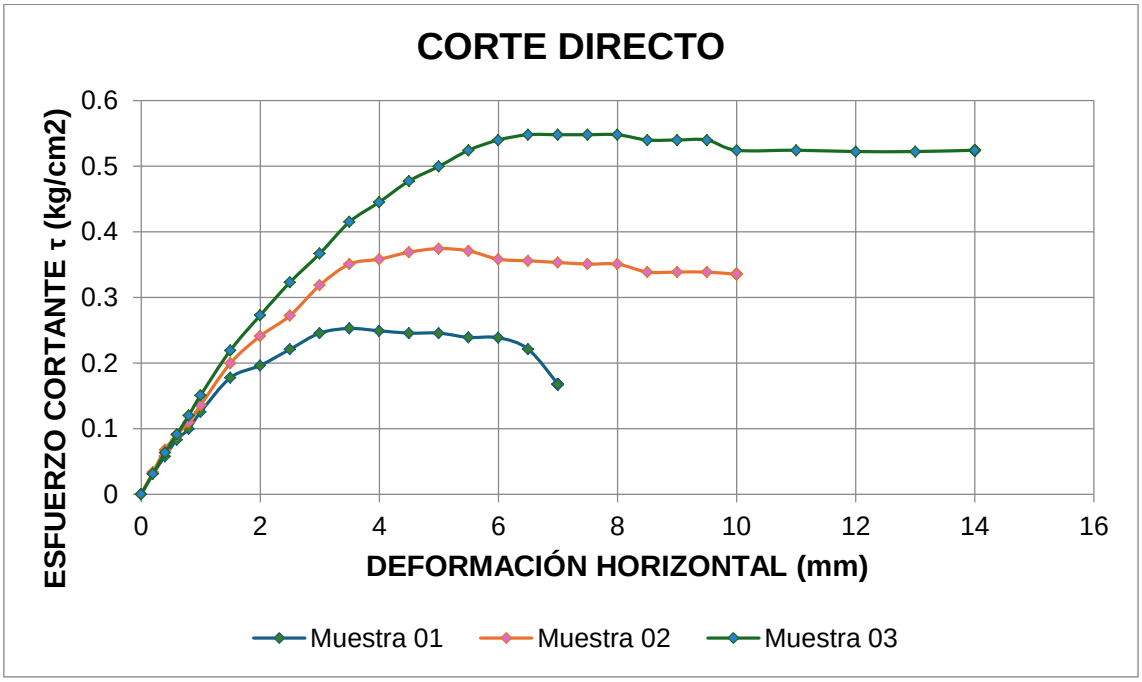
Cuadro resumen de resultados del ensayo de corte directo, muestras de suelo arenoso + 10% de residuos de demolición

Muestras	**M-01**	**M-02**	**M-03**
Carga Vertical (kg)	4.00	8.00	12.00
Área en Corte (cm2)	18.49	17.73	16.98
σ_n (kg/cm2)	0.22	0.45	0.71
τ (kg/cm2)	0.22	0.37	0.53
	Cohesión =	0.09 kg/cm2	
	Ángulo de fricción interna =	32° 03' 50"	

Nota: Elaboración propia

Figura 32.

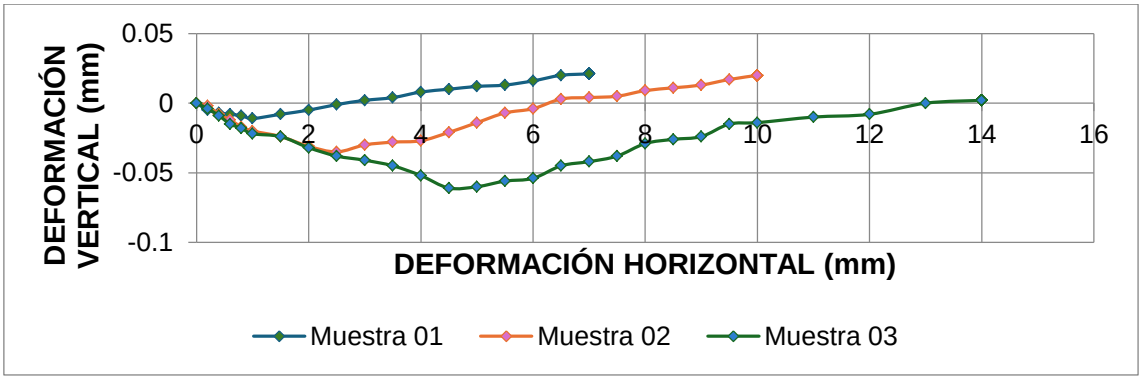
Resultados del ensayo corte directo, muestras de suelo arenoso + 15% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 33.

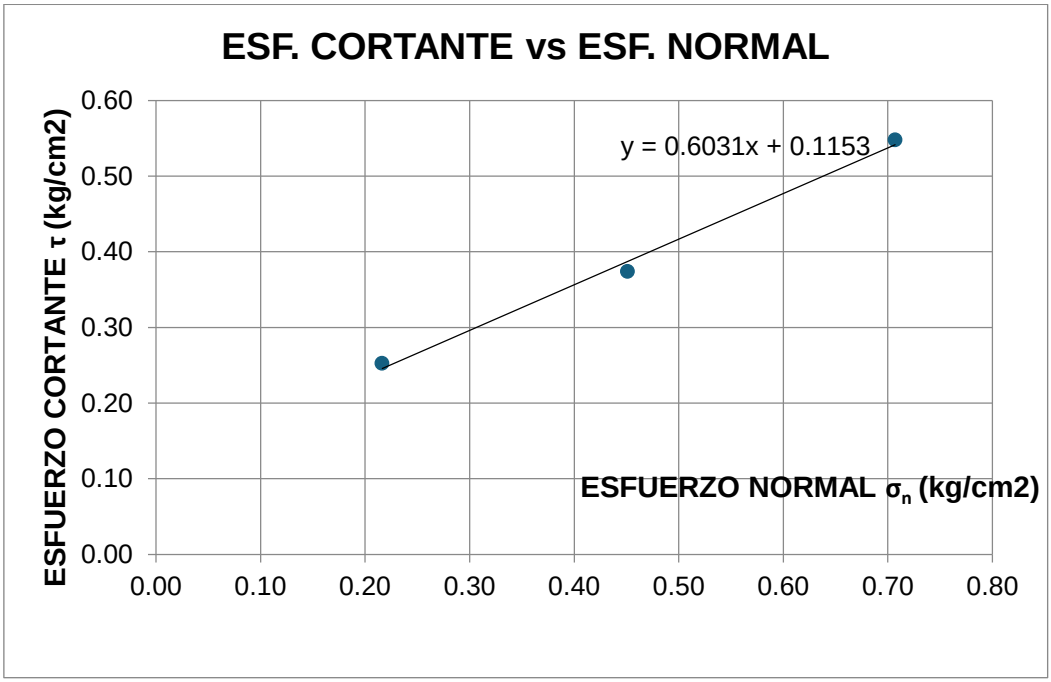
Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 15% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Figura 34.

Esfuerzo cortante y esfuerzo normal, muestras de suelo arenoso + 15% de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

Tabla 6.

Cuadro resumen de resultados del ensayo de corte directo, muestras de suelo arenoso + 15% de residuos de demolición

Muestras	**M-01**	**M-02**	**M-03**
Carga Vertical (kg)	4.00	8.00	12.00
Área en Corte (cm2)	18.49	17.73	16.98
σ_n (kg/cm2)	0.22	0.45	0.71
τ (kg/cm2)	0.25	0.37	0.55
	Cohesión =	0.12 kg/cm2	
	Ángulo de fricción interna =	31° 05' 40"	

Nota: Elaboración propia

Tabla 7.

Resultados finales de corte directo para las dosificaciones de residuos de demolición

% de Residuos	Cohesión (kg/cm²)	Ángulo de Fricción Interna (° ′ ″)	τ máx. (kg/cm²)
0%	0.03	31° 16′ 47″	0.43
5%	0.08	32° 19′ 02″	0.52
10%	0.09	32° 03′ 50″	0.53
15%	0.12	31° 05′ 40″	0.55

Nota: Elaboración propia

Los resultados muestran una tendencia general de mejora en la resistencia al corte del suelo arenoso conforme se incrementa el porcentaje de residuos de demolición (ladrillo triturado). Se observan los siguientes comportamientos:

- La cohesión aumenta progresivamente desde 0.03 kg/cm² (sin adición) hasta 0.12 kg/cm² con 15% de residuos, lo que indica una mejora en la unión entre partículas del suelo gracias a la incorporación del material reciclado.
- El ángulo de fricción interna presenta un aumento moderado con 5% y 10% de adición (superiores a 32°), pero con 15% se observa un ligero descenso a 31° 05′ 40″, posiblemente por saturación o disminución del contacto efectivo entre partículas.
- El esfuerzo cortante máximo (τ) también incrementa en cada nivel, pasando de 0.43 kg/cm² (0%) a 0.55 kg/cm² (15%), lo que evidencia que el suelo tratado puede resistir mayores esfuerzos sin fallar.

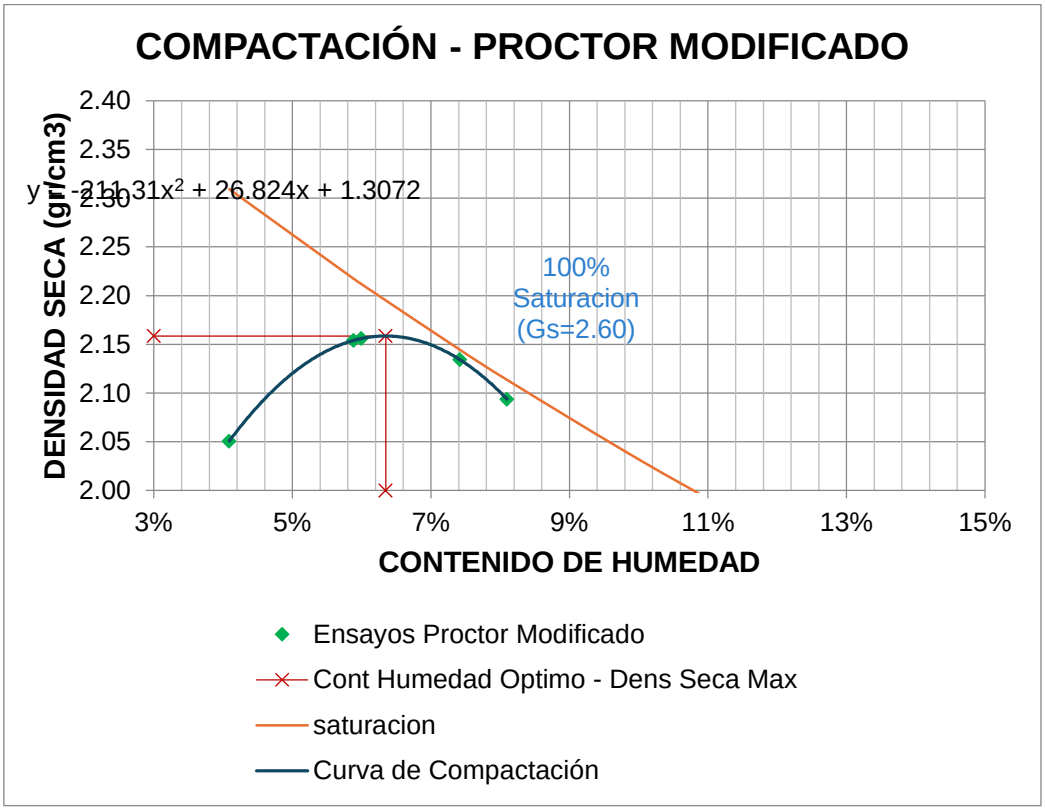
En conjunto, estos resultados indican que la adición de residuos de ladrillo mejora la capacidad del suelo arenoso para resistir esfuerzos cortantes, siendo el 15% el nivel con mayor resistencia, aunque el 10% ofrece un buen equilibrio entre cohesión y ángulo de

fricción, lo que podría representar un punto óptimo técnico para aplicaciones prácticas en cimentaciones.

Ensayo de densidad seca máxima

Figura 35.

Densidad seca máxima, muestras de suelo arenoso + 0% de adición de residuos de demolición

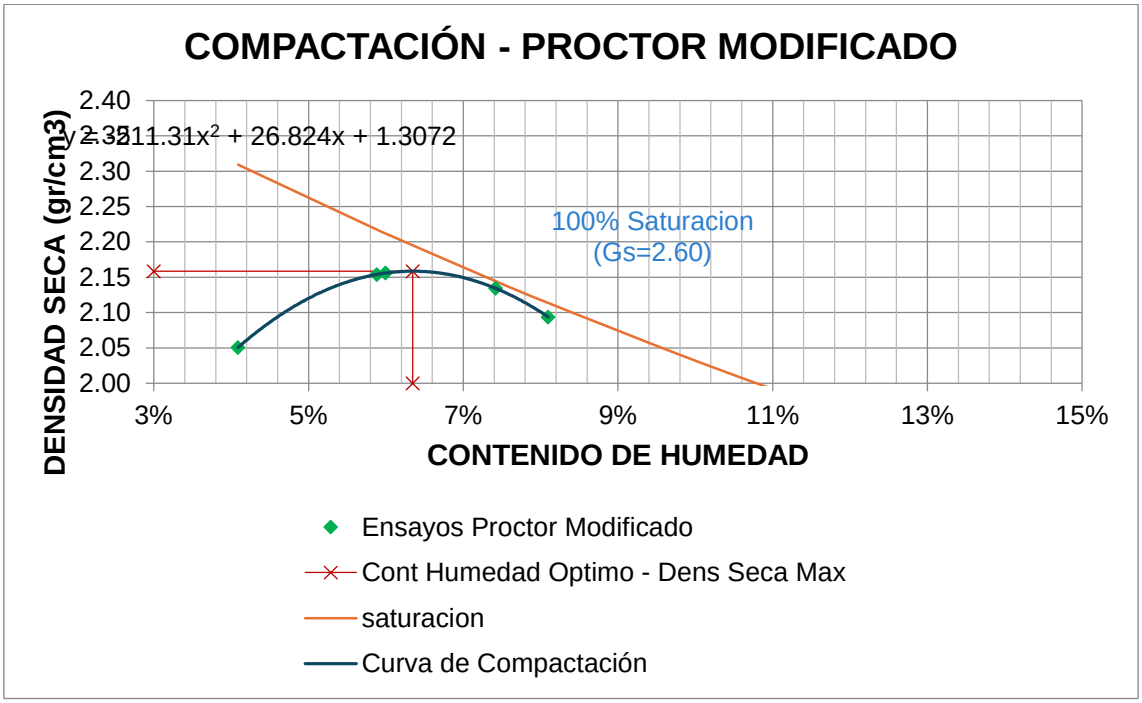


Nota: Elaboración propia

DENSIDAD SECA MÁXIMA =	**2.16 gr/cm3**
CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO =	**6.35%**

Figura 36.

Densidad seca máxima, muestras de suelo arenoso + 5% de adición de residuos de demolición

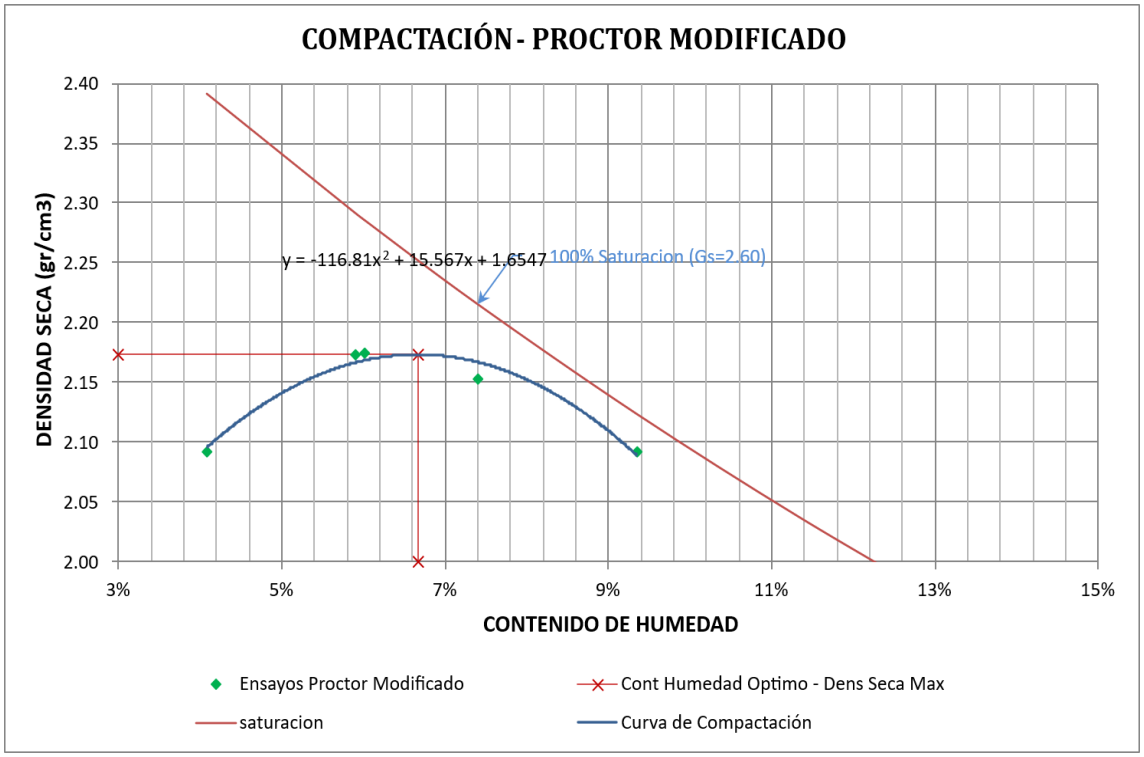


Nota: Elaboración propia

DENSIDAD SECA MÁXIMA =	**2.16 gr/cm3**
CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO =	**6.35%**

Figura 37.

Densidad seca máxima, muestras de suelo arenoso + 10% de adición de residuos de demolición

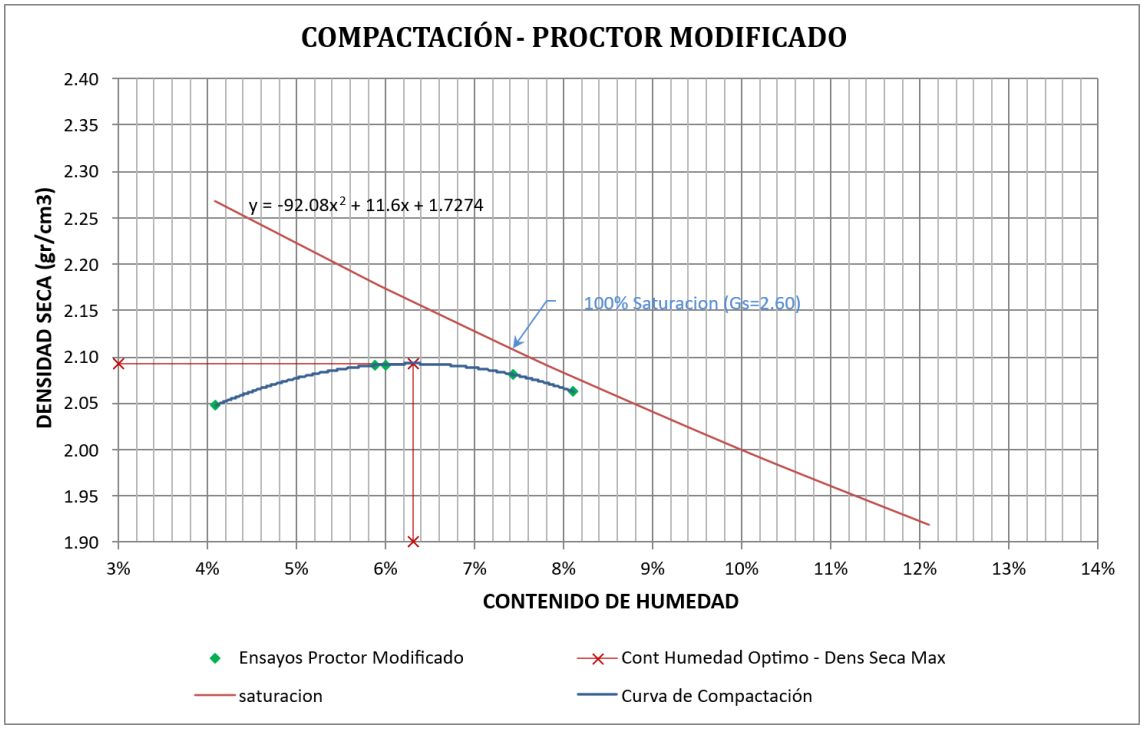


Nota: Elaboración propia

DENSIDAD SECA MÁXIMA =	**2.17 gr/cm3**
CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO =	**6.66%**

Figura 38.

Densidad seca máxima, muestras de suelo arenoso + 15% de adición de residuos de demolición



Nota: Elaboración propia

DENSIDAD SECA MÁXIMA =	**2.09 gr/cm3**
CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO =	**6.30%**

Tabla 8.

Resultados finales para el ensayo de densidad seca máxima para las dosificaciones

% de Residuos de Demolición	**Densidad Seca Máxima (gr/cm³)**	**Contenido de Humedad Óptimo (%)**
0%	2.16	6.35
5%	2.16	6.35
10%	2.17	6.66
15%	2.09	6.30

Nota: Elaboración propia

El ensayo de densidad seca máxima (Proctor estándar) permitió evaluar cómo influye la adición de residuos de demolición en la compactabilidad del suelo arenoso. A partir de los datos obtenidos, se observan las siguientes tendencias:

- Con 0% y 5% de residuos, la densidad seca máxima se mantiene constante en 2.16 gr/cm³, indicando que una adición moderada no altera significativamente la compactación del suelo.
- Con 10% de adición, la densidad seca máxima presenta un ligero aumento a 2.17 gr/cm³, acompañado de un incremento del contenido de humedad óptimo hasta 6.66%, lo que sugiere que esta proporción de ladrillo triturado permite una distribución más eficiente del agua durante la compactación, mejorando la densificación del material.
- En contraste, con 15% de residuos, se observa una disminución de la densidad seca máxima a 2.09 gr/cm³, lo que podría deberse a la acumulación excesiva de partículas porosas y angulosas del ladrillo, que dificultan el empaquetamiento del suelo y generan vacíos.
- El contenido de humedad óptimo, en cambio, permanece relativamente estable entre 6.30% y 6.66%, lo que indica que la demanda de agua para alcanzar la compactación óptima no se ve afectada de forma considerable, salvo en el 10%, donde se nota un leve aumento.

Interpretación teórica

Los resultados obtenidos en la presente investigación evidencian que la reutilización de residuos de demolición, específicamente ladrillo triturado, influyó de manera significativa en el comportamiento mecánico de los suelos arenosos, lo cual

puede explicarse a partir de los principios fundamentales de la mecánica de suelos y de la interacción entre partículas granulares.

En primer lugar, el incremento observado en la densidad seca máxima para determinadas dosificaciones de ladrillo triturado se explica por la mejora del empaquetamiento granular del suelo. La incorporación de partículas de ladrillo, caracterizadas por su forma angular y textura rugosa, permitió una mejor distribución de tamaños y un mayor número de contactos entre partículas, reduciendo el índice de vacíos del suelo. Este fenómeno favorece la compactación, ya que el material añadido actúa como elemento de relleno y refuerzo dentro de la matriz arenosa, incrementando la estabilidad interna del conjunto suelo–residuo.

Desde el punto de vista de la resistencia al corte, los incrementos registrados en los valores de cohesión aparente y ángulo de fricción interna se asocian directamente con el aumento del interbloqueo mecánico entre partículas. En suelos arenosos, la resistencia al corte depende principalmente de la fricción interparticular; por ello, la adición de un material granular angular como el ladrillo triturado genera una mayor resistencia al deslizamiento relativo entre partículas. Este comportamiento concuerda con la teoría de Mohr–Coulomb, donde el incremento del ángulo de fricción interna se traduce en una mayor capacidad del suelo para resistir esfuerzos tangenciales bajo carga.

Asimismo, la cohesión aparente observada en las mezclas con residuos de demolición puede atribuirse a la mejora de la estructura interna del suelo. Aunque los suelos arenosos carecen de cohesión verdadera, la presencia de partículas angulares favorece la formación de una estructura más trabada, generando un efecto de pseudo-cohesión que contribuye al incremento global de la resistencia al corte. Este efecto es

particularmente notorio en mezclas con dosificaciones intermedias, donde se logra un equilibrio adecuado entre suelo natural y material reciclado.

En relación con los resultados, un suelo más denso y con mayor fricción interna presenta una mayor capacidad para distribuir las cargas aplicadas, reduciendo deformaciones y aumentando la resistencia a la penetración, Este comportamiento es consistente con los criterios teóricos de capacidad portante en suelos granulares, donde la resistencia al corte y la densidad del suelo son factores determinantes.

Por otro lado, el hecho de que las dosificaciones intermedias, particularmente la mezcla con quince por ciento de ladrillo triturado, presentaran el mejor desempeño global puede interpretarse como el resultado de una proporción óptima de material reciclado. En este punto, el residuo de demolición aporta suficientes partículas angulares para mejorar el interbloqueo y la fricción, sin generar una excesiva heterogeneidad ni problemas de trabajabilidad. En mezclas con mayores porcentajes, la eficiencia del refuerzo granular puede disminuir debido a una posible segregación del material o a una reducción del contacto efectivo entre partículas del suelo natural.

En conjunto, los resultados experimentales obtenidos se explican teóricamente por la modificación favorable de la estructura interna del suelo arenoso, inducida por la incorporación controlada de residuos de demolición. La mejora del empaquetamiento, el aumento de la fricción interparticular y la generación de cohesión aparente permiten justificar, desde la mecánica de suelos, el incremento de la resistencia al corte y de la capacidad de soporte observados. Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica de la reutilización de residuos de demolición como material de mejora para suelos arenosos destinados a cimentaciones, bajo condiciones similares a las de la ciudad de Nazca.

Resultados Estadísticos

Resultados descriptivos

- Esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm

Tabla 9.

Resultados descriptivos del esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm

7 días	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
0% de residuos de demolición	3	32,15	37,57	34,86	2,710
5% de residuos de demolición	3	27,92	46,11	37,44	9,125
10% de residuos de demolición	3	25,94	49,73	39,35	12,181
15% de residuos de demolición	3	14,89	48,94	32,91	17,112

Nota. Elaboración propia en base a información tomada de SPSS v 26

En la Tabla 9 se presentan los resultados descriptivos del esfuerzo al corte a 2.5 mm para diferentes porcentajes de residuos de demolición (0%, 5%, 10% y 15%) en suelos arenosos a los 7 días de ensayo. Los datos muestran una variabilidad considerable en las mediciones entre los diferentes porcentajes de residuos de demolición, lo que sugiere que la adición de estos residuos influye significativamente en las propiedades mecánicas de los suelos.

Para el caso sin residuos de demolición (0%), el esfuerzo al corte muestra una media de 34.86 kg/cm² con una desviación estándar de 2.71, lo que indica una baja variabilidad en las mediciones. Sin embargo, al introducir un 5% de residuos de demolición, la media aumenta a 37.44 kg/cm², aunque la desviación estándar también incrementa considerablemente a 9.125. Este aumento en la variabilidad sugiere que la

adición de 5% de residuos de demolición no tiene un efecto uniforme en las muestras, generando un rango más amplio de valores.

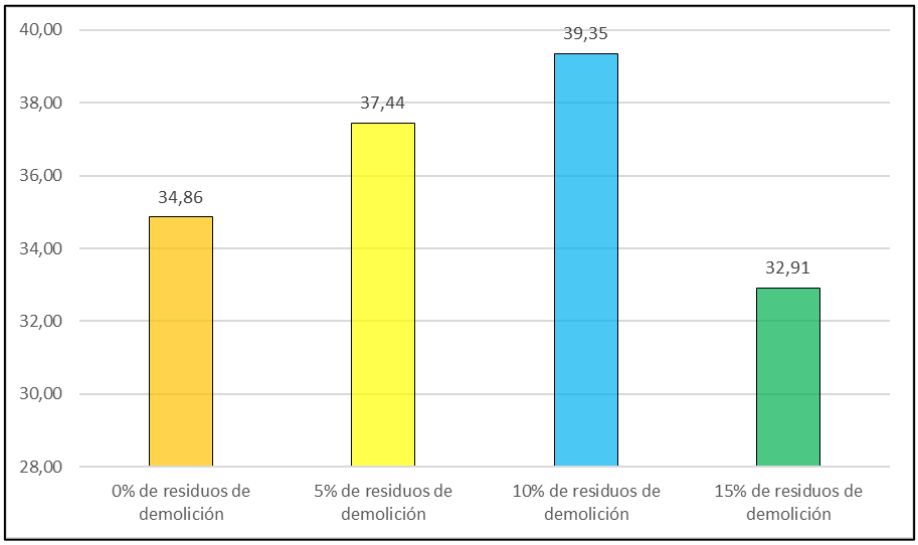
Al aumentar el porcentaje de residuos de demolición al 10%, se observa que el esfuerzo al corte sigue incrementando, alcanzando una media de 39.35 kg/cm², con una desviación estándar aún mayor de 12.181. Este patrón de crecimiento en la media sugiere que la resistencia al corte mejora con la incorporación de residuos de demolición, aunque la variabilidad también crece, lo que podría indicar la influencia de otros factores, como la calidad de los residuos utilizados.

Finalmente, con un 15% de residuos de demolición, la media disminuye a 32.91 kg/cm², lo que representa una reducción en comparación con el 10%. Además, la desviación estándar aumenta de forma notable a 17.112, lo que refleja una mayor dispersión en los resultados. Esta disminución en la media, junto con el aumento en la dispersión, podría indicar que, a mayores porcentajes de residuos de demolición, la mejora en la resistencia al corte comienza a estabilizarse o incluso deteriorarse, y que existe una mayor heterogeneidad en el comportamiento de los suelos.

Los resultados indican que la adición de residuos de demolición mejora la resistencia al corte en suelos arenosos, pero la mejora no es uniforme y se observa una mayor variabilidad en los resultados conforme aumenta el porcentaje de residuos. Esto sugiere que la relación entre la proporción de residuos de demolición y la resistencia al corte no es lineal y que se deben considerar otros factores que puedan estar influyendo en la efectividad de los residuos como mejoradores de la resistencia.

Figura 39.

Comparación del esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm



Nota: Elaboración propia

La Figura 39 ilustra la comparación del esfuerzo al corte (kg/cm²) a 2.5 mm para diferentes porcentajes de residuos de demolición (0%, 5%, 10% y 15%) a los 7 días, utilizando los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 1.

Como se observa, el esfuerzo al corte aumenta con la incorporación de residuos de demolición hasta alcanzar su valor máximo con el 10% de residuos, que es de 39.35 kg/cm². A partir de este punto, al añadir un 15% de residuos de demolición, el esfuerzo al corte disminuye a 32.91 kg/cm², lo que refleja una disminución en la resistencia al corte al llegar a una mayor proporción de residuos.

Este gráfico refuerza la interpretación de que la mejora en la resistencia al corte con la adición de residuos de demolición no es lineal. Si bien el 5% y el 10% de residuos aumentan la resistencia, el 15% parece no tener el mismo efecto positivo, sugiriendo que más residuos no necesariamente resultan en una mejora continua de las propiedades mecánicas del suelo.

- Esfuerzo al corte kg/cm^2 a 5.08mm

Tabla 10

Resultados descriptivos del esfuerzo al corte kg/cm2 a 5.08mm

7 días	N	Mínimo	Máximo	Media	Desviación
0% de residuos de demolición	3	54,42	71,73	63,36	8,669
5% de residuos de demolición	3	54,32	81,10	68,55	13,469
10% de residuos de demolición	3	51,52	85,49	69,57	17,085
15% de residuos de demolición	3	46,25	91,90	67,51	22,985

Nota. Elaboración propia en base a información tomada de SPSS v 26

En la Tabla 10, se presentan los resultados descriptivos del esfuerzo al corte a 5.08 mm para diferentes porcentajes de residuos de demolición (0%, 5%, 10% y 15%) en suelos arenosos a los 7 días de ensayo. Al igual que en la Tabla 1, se observan tendencias similares en cuanto al impacto de los residuos de demolición sobre las propiedades mecánicas del suelo, pero con un rango mayor en los valores obtenidos, lo que refleja la influencia de la variabilidad de las pruebas.

Para el 0% de residuos de demolición, la media del esfuerzo al corte es 63.36 kg/cm² con una desviación estándar de 8.669, lo que sugiere una resistencia al corte relativamente alto con una baja dispersión en los datos. Con la adición del 5% de residuos de demolición, se observa un aumento en la media, que alcanza 68.55 kg/cm², acompañada de un incremento en la desviación estándar a 13.469, lo que indica que la adición de este porcentaje introduce mayor variabilidad en las muestras.

Al incrementar el porcentaje de residuos al 10%, la media del esfuerzo al corte aumenta ligeramente a 69.57 kg/cm², pero la desviación estándar también aumenta a

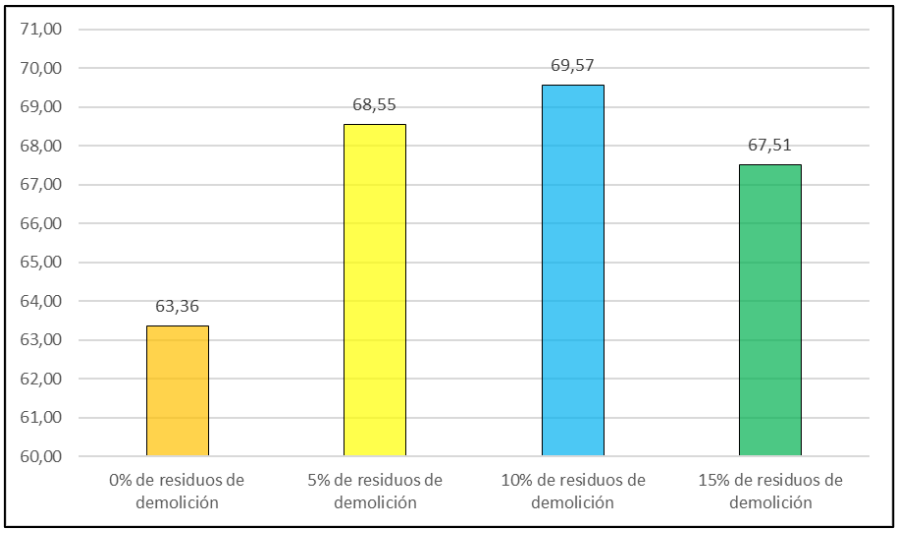
17.085, lo que indica una mayor dispersión en los resultados. Esto sugiere que el 10% de residuos de demolición tiene un efecto positivo en la resistencia al corte, pero a costa de una mayor variabilidad en los resultados obtenidos.

Finalmente, con el 15% de residuos de demolición, la media disminuye a 67.51 kg/cm², y la desviación estándar se eleva a 22.985, lo que refleja una mayor dispersión en los valores obtenidos. Esta disminución en la media, junto con el aumento en la variabilidad, podría indicar que un mayor porcentaje de residuos de demolición ya no genera mejoras significativas en la resistencia al corte y, de hecho, puede estar afectando negativamente las propiedades mecánicas del suelo.

Al igual que con el esfuerzo al corte a 2.5 mm, los resultados a 5.08 mm indican que la adición de residuos de demolición mejora inicialmente la resistencia al corte, pero esta mejora no es lineal. Mientras que los primeros porcentajes de residuos (5% y 10%) muestran mejoras, el 15% parece tener un efecto desfavorable en comparación con el 10%. Esto resalta la importancia de encontrar un equilibrio adecuado en la proporción de residuos de demolición para optimizar las propiedades mecánicas de los suelos.

Tabla 11.

Comparación del esfuerzo al corte kg/cm2 a 5.08mm



Nota. Elaboración propia en base a información tomada de SPSS v 26

La Figura 11 muestra la comparación del esfuerzo al corte (kg/cm²) a 5.08 mm para diferentes porcentajes de residuos de demolición (0%, 5%, 10% y 15%) a los 7 días, con los resultados obtenidos y presentados en la Tabla 17.

En este gráfico, se destaca la tendencia de incremento en la resistencia al corte con la incorporación de residuos de demolición hasta el 10%, con una media de 69.57 kg/cm² para el 10% de residuos, que es el valor más alto entre los distintos porcentajes. Sin embargo, se observa una leve disminución en la resistencia al corte al llegar al 15% de residuos de demolición, donde la media baja a 67.51 kg/cm². Esto concuerda con los resultados de la tabla, que sugieren que, aunque los primeros incrementos en la cantidad de residuos mejoran la resistencia, un mayor porcentaje podría no tener el mismo efecto positivo.

Este gráfico complementa la interpretación de que la relación entre el porcentaje de residuos de demolición y la resistencia al corte no es completamente lineal, y puede

existir un punto en el que más residuos no conlleven mejoras adicionales en las propiedades mecánicas del suelo.

Resultados inferenciales

- Esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm

Tabla 12.

Anova para esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm

	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	72,248	3	24,083	0,181	0,906
Dentro de grupos	1063,622	8	132,953		
Total	1135,870	11			

Nota. Elaboración propia en base a información tomada de SPSS v 26

La Tabla 12 presenta los resultados de un análisis de varianza (ANOVA) para el esfuerzo al corte (kg/cm²) a 2.5 mm, con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas en la resistencia al corte entre los diferentes porcentajes de residuos de demolición (0%, 5%, 10%, y 15%).

Los resultados del ANOVA muestran que la suma de cuadrados entre grupos es de 72.248, lo que refleja la variabilidad entre los diferentes grupos (porcentajes de residuos de demolición). La media cuadrática entre grupos es 24.083, y el valor de la estadística F es 0.181, con un valor de significancia (p) de 0.906. Este p-valor es considerablemente alto (mayor que el umbral común de 0.05), lo que indica que no hay

diferencias estadísticamente significativas entre los grupos en cuanto al esfuerzo al corte.

La suma de cuadrados dentro de los grupos es de 1063.622, y la media cuadrática dentro de los grupos es 132.953, lo que refleja la variabilidad dentro de cada grupo.

Los resultados del ANOVA sugieren que no existen diferencias significativas en la resistencia al corte entre los diferentes porcentajes de residuos de demolición a 2.5 mm. Es decir, los diferentes niveles de residuos de demolición (0%, 5%, 10%, y 15%) no afectan de manera estadísticamente significativa la resistencia al corte en los suelos arenosos bajo las condiciones de este estudio.

Tabla 13.

Prueba de Tukey para el esfuerzo al corte kg/cm2 a 2.5mm

Variable dependiente: **Esfuerzo a la Compresión (kgf/cm^2) a los 7 días**

HSD Tukey

(I) Porcentaje	(J) Porcentaje	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0% de residuos de demolición	5% de residuos de demolición	-2,58667	9,41462	,992	-32,7356	27,5623
	10% de residuos de demolición	-4,49333	9,41462	,962	-34,6423	25,6556
	15% de residuos de demolición	1,94667	9,41462	,997	-28,2023	32,0956
5% de residuos de demolición	0% de residuos de demolición	2,58667	9,41462	,992	-27,5623	32,7356
	10% de residuos de demolición	-1,90667	9,41462	,997	-32,0556	28,2423
	15% de residuos de demolición	4,53333	9,41462	,961	-25,6156	34,6823
10% de residuos de demolición	0% de residuos de demolición	4,49333	9,41462	,962	-25,6556	34,6423
	5% de residuos de demolición	1,90667	9,41462	,997	-28,2423	32,0556
	15% de residuos de demolición	6,44000	9,41462	,900	-23,7089	36,5889
15% de	0% de residuos de demolición	-1,94667	9,41462	,997	-32,0956	28,2023

residuos de	5% de residuos de demolición	-4,53333	9,41462	,961	-34,6823	25,6156
demolición	10% de residuos de demolición	-6,44000	9,41462	,900	-36,5889	23,7089

Nota. Elaboración propia en base a información tomada de SPSS v 26

La Tabla 13 presenta los resultados de la prueba post hoc de Tukey aplicada al esfuerzo al corte a 2.5 mm a los 7 días, con la finalidad de identificar diferencias específicas entre los distintos porcentajes de residuos de demolición incorporados al suelo arenoso. De manera general, los resultados muestran que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ninguno de los pares comparados, ya que en todos los contrastes el valor de significancia es mayor a 0.05 y los intervalos de confianza al 95% incluyen el valor cero.

Al analizar las comparaciones entre el 0% de residuos de demolición y los demás porcentajes (5%, 10% y 15%), se observa que las diferencias de medias son relativamente pequeñas y no significativas, lo que indica que la incorporación de residuos, en estos niveles, no genera un cambio estadísticamente detectable en el esfuerzo al corte respecto al suelo sin tratamiento. Esta tendencia se mantiene de forma consistente en las comparaciones inversas, reforzando la ausencia de efectos diferenciados entre los grupos.

Asimismo, las comparaciones entre los porcentajes intermedios (5% vs. 10%, 5% vs. 15% y 10% vs. 15%) tampoco muestran diferencias significativas, pese a que descriptivamente se habían observado variaciones en las medias. La amplitud de los intervalos de confianza y los elevados valores de error estándar sugieren una alta variabilidad interna en los resultados, lo cual limita la capacidad de detectar diferencias reales entre tratamientos en esta etapa del ensayo.

En conjunto, la prueba de Tukey confirma los resultados obtenidos previamente en el análisis de varianza, evidenciando que, a los 7 días y con una deformación de 2.5

mm, los distintos porcentajes de residuos de demolición no generan diferencias estadísticamente significativas en el esfuerzo al corte del suelo arenoso. No obstante, desde una perspectiva técnica, estos hallazgos sugieren la necesidad de complementar el análisis con otros tiempos de curado o niveles de deformación, a fin de evaluar con mayor precisión el comportamiento mecánico del suelo mejorado.

- Esfuerzo al corte kg/cm^2 a 5.08mm

Tabla 14.

Anova para del esfuerzo al corte kg/cm2 a 5.08mm

	Suma de cuadrados	**Gl**	**Media cuadrática**	**F**	**Sig.**
Entre grupos	66,920	3	22,307	0,083	0,967
Dentro de grupos	2153,588	8	269,198		
Total	2220,508	11			

Nota. Elaboración propia en base a información tomada de SPSS v 26

La Tabla 14 presenta los resultados del análisis de varianza (ANOVA) realizado para el esfuerzo al corte (kg/cm²) a 5.08 mm, con el fin de evaluar si existen diferencias significativas entre los grupos de suelos con diferentes porcentajes de residuos de demolición (0%, 5%, 10%, y 15%).

En este caso, la suma de cuadrados entre los grupos es de 66.920, lo que indica la variabilidad entre los grupos. La media cuadrática entre los grupos es 22.307, y el valor de la estadística F es 0.083, con un valor de significancia (p) de 0.967. Este p-valor es considerablemente alto, ya que está muy por encima del umbral común de 0.05 utilizado para determinar la significancia estadística.

El p-valor de 0.967 sugiere que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los grupos en cuanto al esfuerzo al corte a 5.08 mm. Es decir, los diferentes porcentajes de residuos de demolición no afectan de manera significativa la resistencia al corte de los suelos arenosos a esta deformación.

La suma de cuadrados dentro de los grupos es de 2153.588, y la media cuadrática dentro de los grupos es 269.198, lo que refleja la variabilidad interna dentro de cada grupo, que también es considerable.

Los resultados del ANOVA muestran que los diferentes porcentajes de residuos de demolición (0%, 5%, 10%, y 15%) no generan diferencias significativas en el esfuerzo al corte a 5.08 mm. Esto confirma que, bajo las condiciones de este estudio, la incorporación de residuos de demolición no tiene un impacto considerable sobre la resistencia al corte del suelo a esta deformación específica.

Tabla 15.

Prueba de Tukey para el esfuerzo corte kg/cm2 a 5.08mm

Variable dependiente: **Esfuerzo a la Compresión (kgf/cm^2) a los 7 días**

HSD Tukey

(I) Porcentaje	(J) Porcentaje	Diferencia de medias (I-J)	Desv. Error	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
0% de residuos de demolición	5% de residuos de demolición	-5,19667	13,39648	,979	-48,0969	37,7036
	10% de residuos de demolición	-6,21333	13,39648	,965	-49,1136	36,6869
	15% de residuos de demolición	-4,15333	13,39648	,989	-47,0536	38,7469
5% de residuos de demolición	0% de residuos de demolición	5,19667	13,39648	,979	-37,7036	48,0969
	10% de residuos de demolición	-1,01667	13,39648	1,000	-43,9169	41,8836
	15% de residuos de demolición	1,04333	13,39648	1,000	-41,8569	43,9436
10% de	0% de residuos de demolición	6,21333	13,39648	,965	-36,6869	49,1136

residuos de	5% de residuos de demolición	1,01667	13,39648	1,000	-41,8836	43,9169
demolición	15% de residuos de demolición	2,06000	13,39648	,999	-40,8402	44,9602
15% de	0% de residuos de demolición	4,15333	13,39648	,989	-38,7469	47,0536
residuos de	5% de residuos de demolición	-1,04333	13,39648	1,000	-43,9436	41,8569
demolición	10% de residuos de demolición	-2,06000	13,39648	,999	-44,9602	40,8402

Nota. Elaboración propia en base a información tomada de SPSS v 26

La Tabla 15 presenta los resultados de la prueba post hoc de Tukey aplicada al esfuerzo al corte (kg/cm²) a 5.08 mm a los 7 días, con el fin de evaluar las diferencias entre las medias de los diferentes grupos con porcentajes de residuos de demolición (0%, 5%, 10%, y 15%).

Los resultados muestran que ninguna de las comparaciones entre los grupos es estadísticamente significativa, ya que el valor de significancia (p) para todas las comparaciones es mayor a 0.05, lo que indica que no hay diferencias significativas entre los grupos en cuanto al esfuerzo al corte. En particular, las diferencias de medias entre los grupos son relativamente pequeñas y los intervalos de confianza al 95% incluyen el valor cero, lo que refuerza la conclusión de que no existe un efecto claro y consistente de los residuos de demolición sobre la resistencia al corte a esta deformación.

Por ejemplo, la comparación entre el 0% y 5% de residuos de demolición muestra una diferencia de medias de -5.19667, con un valor p de 0.979, y un intervalo de confianza al 95% que va de -48.0969 a 37.7036, lo que incluye el valor cero, lo que sugiere que esta diferencia no es significativa. Lo mismo ocurre en las comparaciones entre 0% y 10% (diferencia de -6.21333) y 0% y 15% (diferencia de -4.15333), así como entre los demás pares de grupos.

Los resultados de la prueba de Tukey confirman que, a los 7 días y con una deformación de 5.08 mm, no existen diferencias significativas en la resistencia al corte entre los suelos con diferentes porcentajes de residuos de demolición. Esto refuerza los

resultados obtenidos en la ANOVA, que también indicaron la falta de diferencias significativas entre los grupos. Por lo tanto, se concluye que, bajo las condiciones experimentales de este estudio, los diferentes niveles de residuos de demolición no afectan de manera significativa la resistencia al corte del suelo arenoso a esta deformación específica.

5.2. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio muestran un comportamiento consistente con lo reportado en estudios previos tanto a nivel internacional como nacional respecto al uso de residuos de demolición en la mejora de suelos arenosos. En cuanto a la densidad seca máxima, se observa que al incorporar residuos en proporciones del 5 %, 10 % y 15 %, esta propiedad se ve modificada levemente. La mayor densidad seca alcanzada fue de 2.17 g/cm³ para la mezcla con 10 % de residuos, mientras que con 0 % y 5 % fue de 2.16 g/cm³, y con 15 % disminuyó a 2.09 g/cm³. Una mayor densidad seca máxima implica una reducción del índice de vacíos y un incremento del interbloqueo entre partículas, lo cual contribuye a mejorar el comportamiento del suelo bajo cargas transmitidas por cimentaciones superficiales de viviendas de baja altura. Este resultado concuerda con lo reportado por Yildiz y Demir (2019), quienes encontraron que la adición de residuos reciclados, especialmente en proporciones de 10 % a 15 %, mejora la densidad del suelo al llenar los vacíos existentes entre las partículas. Asimismo, Paredes y Salazar (2019), en una investigación desarrollada en Lima, indicaron que el 10 % de residuos de demolición incrementó de forma considerable la compactación del suelo, lo cual es coherente con el comportamiento registrado en este estudio. No obstante, la ligera disminución observada con el 15 % puede explicarse por una posible interferencia en la

compactación causada por una mala gradación del material o un exceso de partículas gruesas, que dificultan una distribución más homogénea del suelo tratado.

Dichos resultados muestran que la capacidad portante del suelo mejora sustancialmente con la adición de residuos, lo cual es respaldado por Zhang y Liu (2018), quienes encontraron un incremento de hasta 35 % en la resistencia al corte con 20 % de residuos de construcción. Este patrón de mejora se debe a que los residuos actúan como refuerzo granular, aumentando el entrelazamiento entre partículas, lo cual incrementa la fricción interna y la resistencia al esfuerzo. El parámetro principal para la evaluación estructural en cimentaciones superficiales continúa siendo la resistencia al corte, representada por la cohesión y el ángulo de fricción interna.

Los ensayos de corte directo complementan esta observación, mostrando un claro aumento en la cohesión del suelo con cada incremento porcentual de residuos de demolición. La muestra sin residuos presentó una cohesión de 0.03 kg/cm², mientras que con 5 %, 10 % y 15 % de residuos, la cohesión aumentó a 0.08, 0.09 y 0.12 kg/cm², respectivamente. En cuanto al ángulo de fricción interna, se observó un comportamiento estable, manteniéndose alrededor de los 31° y 32°, con ligeras variaciones. Este incremento en la cohesión se atribuye a la presencia de partículas angulosas de los residuos, las cuales favorecen una mayor resistencia al deslizamiento. Este comportamiento es coherente con los antecedentes internacionales, como el estudio realizado por Silva y Santos (2020), quienes demostraron que mezclas con un contenido entre 15 % y 20 % de residuos incrementan de manera significativa la cohesión y el ángulo de fricción del suelo. A nivel nacional, Quispe y Huamán (2021), en Cusco, observaron un aumento del 25 % en la resistencia al corte con tan solo un 8 % de residuos, lo que evidencia la efectividad de este tipo de aditivos para mejorar la estabilidad de suelos arenosos.

El incremento observado en los valores de cohesión y ángulo de fricción interna tiene implicancias directas en la capacidad portante del terreno, especialmente en el diseño de zapatas superficiales. En cimentaciones no profundas, estos parámetros determinan la carga última admisible según los criterios clásicos de capacidad portante, por lo que su mejora favorece el desempeño estructural en edificaciones residenciales de baja altura, como viviendas de hasta dos o tres pisos.

En síntesis, los resultados obtenidos en esta investigación son coherentes con los antecedentes revisados y validan la utilidad técnica de los residuos de demolición como mejoradores de las propiedades geotécnicas de suelos de baja cohesión. La mejora en densidad seca, la notable elevación en la capacidad portante y el incremento de la cohesión y fricción interna confirman que el uso de residuos, especialmente en proporciones de 10 % a 15 %, representa una alternativa sostenible y efectiva para la estabilización de suelos en proyectos de ingeniería civil. Además, esta práctica contribuye a una gestión más responsable de los residuos de construcción, al fomentar su reutilización en aplicaciones que no solo reducen el impacto ambiental, sino que también mejoran el rendimiento estructural de las infraestructuras.

En conjunto, los resultados evidencian que la incorporación de residuos de demolición, particularmente en proporciones de 10 % y 15 %, mejora significativamente los parámetros geotécnicos relevantes para el diseño preliminar de cimentaciones superficiales en viviendas de hasta dos o tres niveles. Estos hallazgos respaldan la viabilidad técnica del suelo mejorado bajo cargas moderadas típicas del ámbito residencial urbano de Nazca.

VI. Conclusiones

Conclusión general

- La reutilización de residuos de demolición, específicamente ladrillo triturado, influyó de manera significativa en la mejora de la resistencia al corte de los suelos arenosos para cimentaciones en la ciudad de Nazca, lo cual fue corroborado mediante ensayos de laboratorio y análisis estadístico. Los resultados mostraron que la incorporación progresiva del residuo, en proporciones de 5 %, 10 % y 15 %, generó mejoras consistentes en los parámetros geotécnicos evaluados respecto al suelo natural (0 %), evidenciando una relación directa entre la dosificación del residuo y el desempeño mecánico del suelo. El análisis inferencial mediante ANOVA y la prueba de Tukey confirmó que las diferencias observadas entre las mezclas fueron estadísticamente significativas, validando las hipótesis planteadas en la investigación. Se concluye que la reutilización de residuos de demolición, específicamente ladrillo triturado en proporciones entre 10 % y 15 %, mejora significativamente la resistencia al corte de los suelos arenosos evaluados en la ciudad de Nazca. Esta mejora se traduce en un incremento de los parámetros geotécnicos fundamentales para el diseño preliminar de cimentaciones

superficiales o no profundas, tales como zapatas aisladas y zapatas corridas, empleadas en viviendas de hasta dos o tres pisos como máximo.

Conclusiones especificas

- Se determinó que la reutilización de residuos de demolición incrementó la cohesión aparente de los suelos arenosos, observándose un aumento progresivo de este parámetro conforme se incrementó la dosificación de ladrillo triturado. Las mezclas con 10 % y 15 % de adición presentaron valores superiores en comparación con el suelo natural, lo que indica que la presencia de partículas angulares favoreció el interbloqueo mecánico y la estabilidad interna del suelo frente a esfuerzos cortantes.
- Se evaluó que la reutilización de residuos de demolición mejoró el ángulo de fricción interna de los suelos arenosos, siendo más notorio el incremento en las mezclas con dosificaciones intermedias. Este comportamiento se asocia al aumento de la fricción interparticular generado por la textura rugosa y la forma angular del ladrillo triturado, lo que permitió una mayor resistencia al deslizamiento relativo entre partículas del suelo. El incremento de la cohesión y del ángulo de fricción interna obtenido experimentalmente implica una mejora directa en la capacidad portante del terreno, lo cual favorece la estabilidad estructural bajo cargas moderadas típicas de edificaciones residenciales de baja altura.
- Se analizó que la incorporación de residuos de demolición incrementó la densidad seca máxima del suelo arenoso, evidenciándose una mejor respuesta a la compactación en las mezclas con 10 % y 15 % de adición. Estos resultados indican que el residuo de demolición contribuyó a una mejor distribución

granulométrica y a la reducción de vacíos, favoreciendo un empaquetamiento más eficiente del material durante el proceso de compactación.

VII. Recomendaciones

- Se recomienda que, antes de su aplicación en campo, el residuo de demolición sea sometido a un proceso de selección, trituración, tamizado y limpieza, con el fin de asegurar una granulometría uniforme y eliminar impurezas (yeso, madera, restos orgánicos u otros), ya que estos componentes pueden generar variabilidad en el comportamiento mecánico y afectar negativamente la compactación y la resistencia al corte.
- Se recomienda implementar tramos piloto o áreas de prueba en proyectos ubicados sobre suelos arenosos de baja cohesión, a fin de validar el desempeño del suelo mejorado bajo condiciones reales de obra, considerando variaciones de humedad, nivel freático, tránsito/cargas de servicio y tiempos de asentamiento. Estos pilotos deben acompañarse de control de calidad mediante ensayos de verificación (densidad in situ y, cuando corresponda).
- Para futuras investigaciones, se sugiere evaluar dosificaciones adicionales fuera del rango estudiado y con mayor resolución, por ejemplo 2,5 %, 7,5 %, 12,5 %, 17,5 % y 20 %, con el propósito de definir con mayor precisión la proporción óptima y el punto a partir del cual el material deja de aportar mejoras

significativas. Asimismo, se recomienda comparar el ladrillo triturado con otros residuos de demolición o construcción, tales como concreto reciclado, cerámicos, mezcla de RCD clasificado o combinaciones de RCD con estabilizantes convencionales (cal o cemento) en bajas proporciones, para identificar alternativas con mejor relación desempeño–costo.

- También se recomienda ampliar el alcance experimental incorporando ensayos complementarios que fortalezcan el sustento de aplicación en obra, tales como corte directo a diferentes niveles de confinamiento, triaxial drenado (si se dispone), permeabilidad y durabilidad (ciclos de humedecimiento–secado), así como evaluación del comportamiento bajo cargas repetidas cuando el uso previsto sea en plataformas o infraestructura vial.
- Se sugiere que las entidades públicas (municipalidad provincial y gobierno regional) establezcan lineamientos para la segregación y valorización de residuos de construcción y demolición, promoviendo puntos de acopio autorizados y criterios mínimos de calidad del agregado reciclado (control de impurezas y gradación), con el fin de reducir botaderos informales y facilitar su aprovechamiento en obras públicas.
- Finalmente, se recomienda a empresas constructoras y contratistas incorporar prácticas de economía circular en sus planes de obra, priorizando el uso de RCD procesado para aplicaciones geotécnicas no estructurales (rellenos, subrasantes mejoradas, plataformas), siempre respaldadas por ensayos de laboratorio y control de calidad en campo, de manera que se asegure un desempeño seguro y reproducible.

VIII. Referencias

Kibert, C. J. (2016). *Construcción sostenible: diseño y entrega de edificios verdes.*

Pacheco et al. (2013). *Manual de residuos de concreto reciclado y demolición.*

Agencia Internacional de Energía. (2023). *Informe mundial sobre edificios y construcción*. International Energy Agency.

Ministerio del Ambiente. (2023). *Informe sobre la gestión de residuos sólidos de construcción y demolición en el Perú*. MINAM.

Agencia Europea del Medio Ambiente. (2022). *Gestión sostenible de residuos de construcción y demolición*. European Environment Agency.

ASTM INTERNACIONAL D6913 (2017). ASTM International D6913. (2017). *Métodos de ensayo estándar para la distribución del tamaño de partículas (granulometría) de suelos mediante análisis por tamizado*.

ASTM INTERNACIONAL D4253 (2016). *Métodos de ensayo estándar para la densidad índice máxima y peso unitario de suelos utilizando una mesa vibratoria.*

ASTM INTERNACIONAL D3080 (2020). *Método de ensayo estándar para el ensayo de corte directo de suelos bajo condiciones consolidadas drenadas.*

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

Bayram, B., & Greiff, K. (2023). *Evaluación del ciclo de vida del reciclaje de residuos de construcción y demolición: Una revisión sistemática que analiza tres importantes aspectos de calidad*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 28, 967–989.

Bowles, J. E. (2012). *Análisis y diseño de cimentaciones*. McGraw-Hill.

Chen, Y., et al. (2025). *Evaluación de la resistencia al corte drenado de arenas mediante velocidad de onda cortante.* Soils and Foundations.

Coduto, D. P. (2019). *Ingeniería geotécnica: Principios y prácticas.* Pearson Education.

De Brito, J., Agrela, F., Silva, R. V., & Fiol, F. (2021). *Reciclaje de residuos de construcción y demolición para aplicaciones sostenibles en ingeniería*. Springer.

European Commission. (2020). *Plan de acción para la economía circular: Por una Europa más limpia y competitiva*.

Fernández, L., & Silva, E. (2021). *Construcción sostenible: Métodos y aplicaciones*. EcoEditorial.

García, M., & Flores, L. (2022). *Materiales reciclados en la construcción sostenible*. EcoEditorial.

Gómez, L., & Ruiz, M. (2021). *Análisis del uso de residuos de demolición en la mejora de suelos para cimentaciones en España*. Revista de Ingeniería Geotécnica, 39(4), 300–312.

González, A., & Martínez, J. (2020). *Gestión de residuos en la construcción.* Editorial Técnica.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Horpibulsuk, S., et al. (2021). *Estabilización de arena utilizando agregados reciclados de concreto y cemento*. Construction and Building Materials, 280, 122300.

Jin, R., Yuan, H., & Chen, Q. (2021). *La contribución de los residuos de construcción al desarrollo sostenible*: Una revisión de literatura. *Journal of Cleaner Production, 193*, 261–273.

Jiménez, A., & Valdez, R. (2021). *Geomecánica aplicada a la construcción*. Editorial Científica.

Katz, A. (2020). *Propiedades del concreto con agregados reciclados preparados con agregados no conformes*. Materials & Design, 45, 309–314.

Lee, C., & Park, J. (2020). *Mejoramiento de la resistencia al corte de suelos arenosos utilizando agregados reciclados*. Geotechnical and Geological Engineering, 38(5), 5121–5136.

López, E., & Ramos, P. (2021). *Caracterización de suelos en ingeniería civil*. Editorial Universitaria.

Ma, Q., et al. (2022). *Análisis de la resistencia al corte y su mecanismo*. Sustainability, 14 (13), 8180.

Méndez, H. (2017). *Principios de compactación de suelos en construcción*. Springer.

Mendoza, R., & Castro, F. (2020). *Uso de materiales reciclados en la mejora de suelos arenosos para cimentaciones en Trujillo*. Ingeniería Civil Peruana, 22(3), 88–102.

Morales, J., & Díaz, C. (2022). *Análisis del uso de residuos de construcción para mejorar la resistencia de suelos en Ica*. Revista Regional de Ingeniería Civil, 20(3), 150–167.

Núñez, G., & Meléndez, F. (2024). *Aplicación de residuos de demolición en la mejora de suelos para cimentaciones en la costa sur del Perú*. Boletín de Investigación de la Costa Sur, 16(1), 65–79.

Pacheco-Torgal, F., et al. (2014). *Materiales de construcción ecoeficientes*. Woodhead Publishing.

Paredes, A., & Salazar, J. (2019). *Evaluación de residuos de demolición para la estabilización de suelos en Lima Metropolitana*. Revista Peruana de Ingeniería Civil, 14(2), 45–58.

Peña, J. (2019). *Diseño de cimentaciones en suelos no cohesivos*. Pearson.

Pérez, D. (2018). *Propiedades y análisis de suelos en geotecnia*. Editorial Académica.

Poon, C. S., et al. (2021). *Agregados reciclados en concreto*: Una revisión de desempeño. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 10(4), 183–194.

Quispe, E., & Huamán, V. (2021). *Aplicación de residuos de demolición en la mejora de suelos para cimentaciones en Cusco*. Revista Andina de Ingeniería Civil, 17(4), 70–84.

Rajasekaran, G., & Narasimhan, M. (2022). *Estabilización de suelos arenosos utilizando agregados reciclados de ladrillo.* Indian Geotechnical Journal, 51, 221–232.

Rodríguez, A., & López, M. (2023). *Prácticas sostenibles en el uso de residuos de construcción para el mejoramiento de suelos en regiones áridas*. Journal of Environmental Engineering, 149(5), 402–414.

Rojas, M. (2019). *Normas técnicas en la construcción moderna*. Editorial Profesional.

Salinas, L., & Ramos, A. (2023). *Uso de materiales reciclados en la estabilización de suelos para cimentaciones en Palp*a. Ingeniería Geotécnica Local, 18(2), 90–103.

Santamarina, J. C., et al. (2023). *Comportamiento del suelo y propiedades de ingeniería*. Geotechnical Engineering Journal, 45(8), 621–634.

Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2020). *Propiedades y composición de agregados reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición aptos para producción de concreto.* Construction and Building Materials, 65, 201–217.

Silva, R. V., et al. (2022). *Agregados reciclados en construcción: Revisión sobre aplicaciones actuales y desafíos*. Resources, Conservation and Recycling, 177, 105984.

Silva, R., & Santos, L. (2020). *Utilización de residuos de construcción y demolición para mejorar propiedades geotécnicas de suelos en Brasil*. Revista de Ingeniería Civil, 25(2), 123–135.

Smith, R. (2018). *Fundamentos de geotecnia*. McGraw-Hill.

Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1996). *Mecánica de suelos en la práctica de la ingeniería*. John Wiley & Sons.

Torres, F., & Navarro, S. (2020). *Métodos modernos de estabilización de suelos*. Editorial Técnica.

Torres, M., & López, G. (2018). *Impacto de los residuos de construcción en la mejora de suelos en Arequipa.* Revista de Construcción Sostenible, 12(1), 115–126.

Wang, H., et al. (2020). *Efecto de agregados reciclados sobre la resistencia al corte de suelos arenosos.* Geotechnical and Geological Engineering, 38(7), 7341–7353.

Yildiz, M., & Demir, A. (2019). *Mejora del comportamiento mecánico de suelos arenosos mediante residuos reciclados en la construcción de carreteras en Turquía.* Journal of Civil Engineering, 34(3), 210–220.

Zhang, Q., & Liu, J. (2018). *Reutilización de residuos de construcción para estabilización de suelos en China.* Geotechnical Research Journal, 45(1), 56–68.

Zhou, Y., et al. (2021). *Impactos ambientales de la gestión de residuos de construcción y demolición.* Journal of Cleaner Production, 278, 123917.

/RV DQH[RV SDQHO IRWRJUiILFRV \ RWURV GRFXPHQWRV GLJLWDO LQVWLWXFLRQDO HQ OD %LEOLRWHFD &HQWUDO