



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL



SISTEMA REVISADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SRCS) COMO HERRAMIENTA PARA LA SUSCEPTIBILIDAD A LA LICUACIÓN

POR

Catalina Sofía Estefanía Brule Arriagada

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Gonzalo Montalva Alvarado

Profesor Comisión
Daniella Escribano Leiva

10 de Abril, 2026
Concepción (Chile)

© 2026 Catalina Sofía Estefanía Brule Arriagada

© 2026 Catalina Sofía Estefanía Brule Arriagada

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi Madre.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de Chile, a través del proyecto Anillo EASER (Evolution Assessment of Seismic Risk) (ACT240044), así como el proyecto FONDECIT Iniciación (No. 11241067),

Agradezco a Gonzalo Montalva y Daniella Escribano por su guía, apoyo y acompañamiento a lo largo de todo este proyecto. Su disposición, sus observaciones y su constante orientación fueron esenciales para el desarrollo de esta memoria y para mi aprendizaje durante esta etapa.

Del mismo modo, agradezco también a Alex, Leslie y Fito por su apoyo incondicional, su preocupación constante y su cercanía a lo largo de este proceso. Su compañía y apoyo fueron un gran respaldo a lo largo de las etapas más desafiantes de este proceso.

Asimismo, agradezco a mis compañeras de carrera Catalina Palma, Mónica Pérez y Priscila Esparza, por compartir conmigo este camino, por el apoyo mutuo, la amistad y todos los momentos vividos durante estos años.

Extiendo también mi agradecimiento a mis compañeros de área, Vicente Vera y José Riquelme, y al Grupo de Geotecnia de la Universidad de Concepción, por la colaboración brindada, la buena disposición, el compañerismo y los momentos compartidos. Haber formado parte de este entorno fue una experiencia muy valiosa, tanto en lo académico como en lo personal.

RESUMEN

La susceptibilidad a la licuación en mezclas arena–finos constituye una preocupación central en ingeniería geotécnica, debido a la dificultad que presentan los suelos transicionales para ser representados mediante criterios convencionales, basados en el contenido de finos e índice de plasticidad. La práctica actual emplea estos parámetros para orientar la evaluación preliminar del comportamiento del suelo frente a carga cíclica, sin embargo, su capacidad de discriminación resulta limitada cuando la fracción fina comienza a modificar la matriz resistente sin alcanzar aún los umbrales fijos comúnmente adoptados. En este estudio, se evalúa la capacidad del Sistema Revisado de Clasificación de Suelos (SRCS), para organizar e interpretar el comportamiento cíclico de mezclas arena–finos, a partir de ensayos triaxiales cíclicos no drenados.

Se desarrolló un programa experimental sobre mezclas reconstituidas elaboradas con arena Biobío y tres tipos de finos de distinta naturaleza, considerando variaciones en el contenido de finos y en la relación de vacíos inicial, junto con la caracterización de los materiales mediante la determinación de sus propiedades físicas e índice. Se ejecutaron ensayos triaxiales cíclicos no drenados bajo condiciones controladas de saturación, consolidación y carga, y la respuesta se examinó a partir de la acumulación de deformación, la generación de presión de poros, las trayectorias de esfuerzos efectivos y los mecanismos de inestabilidad desarrollados. El análisis confirma que la respuesta cíclica depende de la interacción entre el estado inicial, el tipo y el contenido de finos, y que la mayor variabilidad del comportamiento se concentra en la zona transicional.

Finalmente, se establece que la influencia de los finos sobre la respuesta cíclica comienza a manifestarse para contenidos inferiores al 20% y que la sensibilidad eléctrica (S_E) presenta una capacidad de discriminación superior a la del índice de plasticidad para organizar la respuesta observada. Asimismo, se confirma que el SRCS permite representar de manera más consistente comportamientos transicionales, que no son adecuadamente capturados por criterios actuales. Esto respalda el uso de clasificaciones con mayor fundamento físico para interpretar la susceptibilidad a la licuación en mezclas arena–finos y para apoyar una selección más fundamentada de los procedimientos de análisis aplicables al estudio del comportamiento sísmico del terreno.

ABSTRACT

Liquefaction susceptibility in sand–fines mixtures constitute a central concern in geotechnical engineering, due to the difficulty of representing transitional soils through conventional criteria, based on the fines content and plasticity index. Current practice uses these parameters to guide the preliminary assessment of soil behavior under cyclic loading, however, their discriminatory capacity becomes limited when the fine fraction begins to modify the load-bearing matrix without yet reaching the commonly adopted fixed thresholds. In this study, the capacity of the Revised Soil Classification System (RSCS) to organize and interpret the cyclic behavior of sand–fines mixtures is evaluated, based on undrained cyclic triaxial tests.

An experimental program was developed on reconstituted mixtures prepared with Biobío sand and three types of fines of different nature, considering variations in fines content and initial void ratio, together with the characterization of the materials through the determination of their physical and index properties. Undrained cyclic triaxial tests were performed under controlled saturation, consolidation, and loading conditions, and the response was examined based on strain accumulation, pore-pressure generation, effective stress paths, and the instability mechanisms developed. The analysis confirms that the cyclic response depends on the interaction among the initial state, the type and content of fines, and that the greatest variability in behavior is concentrated in the transitional zone.

Finally, it is established that the influence of fines on cyclic response begins to manifest for contents below 20% and that electrical sensitivity (S_E) presents a greater discriminatory capacity than the plasticity index for organizing the observed response. Likewise, it is confirmed that the RSCS allows transitional behaviors to be represented more consistently, which are not adequately captured by current criteria. This supports the use of classifications with a stronger physical basis to interpret liquefaction susceptibility in sand–fines mixtures and to support a more informed selection of analysis procedures applicable to the study of the seismic behavior of the ground.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance del estudio	2
1.4. Metodología de trabajo.....	3
1.5. Principales resultados	4
1.6. Organización de la memoria de título	4
CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	5
2.1. Introducción	5
2.2. Antecedentes	5
2.3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	6
2.4. Sistema Revisado de Clasificación de Suelos (SRCS).....	8
2.5. Conclusiones	17
CAPÍTULO 3: LICUACIÓN Y CRITERIOS DE SUSCEPTIBILIDAD.....	18
3.1. Introducción	18
3.2. Licuación.....	18
3.3. Criterios de Susceptibilidad	20
3.4. Evaluación experimental de la respuesta a la licuación	23
3.4.1 Ensayo triaxial cíclico no drenado	23
3.4.2 Criterios de falla	24
3.5. Conclusiones	25
CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	27
4.1. Introducción	27
4.2. Mezclas arena-finos.....	27

4.2.1	Descripción arena Biobío	27
4.2.2	Descripción finos.....	28
4.3.	Programa de Ensayos	29
4.4.	Métodos de Reconstitución	31
4.5.	Ensayo Triaxial	32
4.6.	Conclusiones	33
CAPÍTULO 5: RESULTADOS		34
5.1.	Introducción	34
5.2.	Resultados de los Ensayos Triaxiales Cíclicos No Drenados	34
5.3.	Resultados de la influencia del estado inicial y del contenido de finos en la respuesta cíclica de las mezclas.....	35
5.4.	Resultados de la respuesta cíclica de las mezclas en función de SRCS.....	38
5.5.	Conclusiones	40
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES		42
6.1.	Influencia de las variables de clasificación de la fracción fina	42
6.2.	Influencia de la zona transicional y del umbral de finos sobre la respuesta cíclica de las mezclas	42
6.3.	Limitaciones del estudio.....	43
6.4.	Líneas futuras de trabajo	44
REFERENCIAS.		45
ANEXO 1. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE.....		50
ANEXO 5.1. RESPUESTA CÍCLICA DE LAS MEZCLAS		51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Propiedades índice y clasificación de los finos evaluados según Jang y Santamarina (2016)	
.....	29
Tabla 4.2: Propiedades físicas básicas de las mezclas arena–finos ensayados.	31
Tabla 4.3: Valores de CSR compilados de la literatura para este estudio.....	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Carta de plasticidad suelos finos. Fuente: (ASTM D2487-17, 2017).....	8
Figura 2.2: Mezclas grueso-fino: fracciones umbral; mezclas dominadas por la fracción gruesa, transicionales y dominadas por la fracción fina; estos esquemas conceptuales se aplican a mezclas grava-arena, grava-finos y arena-finos. Fuente: (Park & Santamarina, 2017).....	10
Figura 2.3: Gráfico de Krumbein y Sloss (1963) para la clasificación de la forma de las partículas. 11	
Figura 2.4: Empaquetamiento y forma de partículas. (a) Esfericidad. (b) Efectos de la redondez para diversas arenas uniformes. Fuente: (Santamarina & Cho, 2004).....	12
Figura 2.5: Sistema Revisado de Clasificación de Suelos en el diagrama triangular grava-arena-finos. Fuente:(Castro et al., 2023).	14
Figura 2.6: Clasificación de finos basada en la sensibilidad a la química del fluido de poros: (a) los límites circulares corresponden a sensibilidades eléctricas $S_E=0.4$ (rojo) y $S_E=1.0$ (azul); y (b) la nomenclatura de dos letras para la clasificación de finos indica la plasticidad del suelo (N, L, I o H) y la sensibilidad eléctrica (L, I o H). Fuente: (Castro et al., 2023).	16
Figura 2.7: Sistema Revisado de Clasificación de Suelos: árbol lógico completo. Fuente: (Castro et al., 2023).....	16
Figura 3.1: Elementos clave de la ingeniería de la licuación de suelos. Fuente: (Seed et al., 2003). 19	
Figura 3.2: Métodos utilizados para determinar la susceptibilidad a la licuación: (a) Seed et al. (2003) (b) Bray y Sancio (2006) y (c) Boulanger e Idriss (2006).Fuente: (Armstrong & Malvick, 2016)... 22	
Figura 3.3: Regiones para la evaluación de la licuación, el ablandamiento cíclico y la transición en función del PI y del FC. Fuente: (Armstrong & Malvick, 2016).....	23
Figura 4.1: Microfotografía SEM arena Biobío.	28
Figura 4.2: Microfotografía SEM: (a) Fino MB, (b) Fino MG y (c) Fino CS.	29
Figura 4.3: Curvas de distribución granulométrica: (a) Mezcla BBMB, (b) Mezcla BBMG y (c) Mezcla BBCS.	30
Figura 4.4: Ubicación de las mezclas estudiadas dentro del criterio de susceptibilidad propuesto por Armstrong & Malvick (2016).	31
Figura 5.1: Variación de $N\varepsilon_{DA} = 5\%$ en mezclas arena-finos en función de FC y estado inicial. . 36	
Figura 5.2: Variación de R_u en $\varepsilon_{DA} = 5\%$ en mezclas arena-finos en función de FC y del estado inicial.	37

Figura 5.3: Diagramas de cajas de $N\varepsilon DA = 5\%$ y de Ru al alcanzar $\varepsilon DA = 5\%$, en función de la clasificación estructural del SRCS.	38
Figura 5.4. Variación de Ru en $\varepsilon DA = 5\%$ en mezclas arena-finos en función de IP y del estado inicial.	39
Figura 5.5. Variación de Ru en $\varepsilon DA = 5\%$ en mezclas arena-finos en función de SE y del estado inicial.	40

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Considerando el contexto nacional, las metodologías empleadas para evaluar el desencadenamiento de licuación, por terremotos de subducción, en datos chilenos no reflejan adecuadamente la evidencia observada en superficie, presentando un margen de error cercano al 43% (Montalva et al., 2017). Este nivel de imprecisión evidencia una limitación relevante para determinar de manera confiable el fenómeno de licuación y justifica la necesidad de avanzar en su estudio mediante enfoques más representativos de las condiciones del problema. Resulta pertinente revisar la etapa inicial del marco utilizado para estudiar este fenómeno, ya que esta condiciona de manera significativa el procedimiento final empleado para estimar la resistencia cíclica. Dicha etapa consiste en diferenciar entre suelos de comportamiento “similar a la arena”, “similar a la arcilla” o transicionales, a partir de las marcadas diferencias que presentan frente a cargas cíclicas según sus propiedades índice y de estado. Si bien este enfoque ha sido adecuado para arenas y arcillas, su capacidad de representación es más limitada en suelos transicionales o intermedios, como arenas arcillosas, limos arenosos no plásticos, limos arcillosos de baja plasticidad y depósitos interestratificados, en los que la evaluación de la susceptibilidad a la licuación resulta considerablemente más compleja (Stuedlein et al., 2023).

La definición de estos comportamientos se sustenta en criterios de susceptibilidad, dentro de los cuales, uno de los parámetros tradicionalmente más influyentes ha sido el límite líquido, determinado sobre la fracción pasante por la malla No. 40. Sin embargo, este procedimiento incorpora simultáneamente partículas gruesas y finas, lo que introduce una inconsistencia desde el punto de vista físico, dado que los límites de consistencia corresponden a propiedades inherentes exclusivamente a la fracción fina. En consecuencia, esta práctica puede subestimar el nivel real de plasticidad del suelo y, con ello, afectar la interpretación de su comportamiento potencial frente a la carga cíclica (Kayabali, 2011).

De forma complementaria, otro aspecto que condiciona la interpretación de la susceptibilidad corresponde al control mecánico de la mezcla. En la clasificación convencional, este se atribuye a la fracción fina cuando su contenido es igual o superior al 50 % del material. No obstante, diversos estudios han mostrado que el dominio mecánico de los finos puede alcanzarse con proporciones

considerablemente menores, especialmente en mezclas arena–finos, donde la fracción fina puede pasar a controlar el esqueleto resistente con contenidos del orden de 21 % a 30 % en peso del total (Kaothon et al., 2022).

Además, la transición entre un comportamiento gobernado por la fracción gruesa y otro controlado por los finos, no depende únicamente de un umbral fijo de contenido de finos, sino también, de características propias de la fracción granular, como la redondez de las partículas y el coeficiente de uniformidad, las cuales influyen directamente en la configuración del esqueleto y, en consecuencia, en la respuesta mecánica del suelo. Sin embargo, estas variables no son consideradas de manera explícita en los enfoques de susceptibilidad empleados actualmente. El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- Evaluar la capacidad del Sistema Revisado de Clasificación de Suelos para organizar e interpretar el comportamiento cíclico de mezclas de arena con finos a partir de ensayos triaxiales.

1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar mezclas de arena–finos para evaluar comportamiento ante demanda sísmica.
- Establecer una relación entre la respuesta cíclica observada y los parámetros y clasificaciones del Sistema Revisado de Clasificación de Suelos.
- Evaluar el desempeño de la propuesta planteada frente a los enfoques actualmente utilizados en el estado de la práctica.

1.3. Alcance del estudio

El estudio se enfocó en analizar experimentalmente mezclas arena–finos sometidos a carga cíclica, con el propósito de examinar la relación entre su respuesta mecánica y los parámetros físicos, índice y de clasificación asociados al Sistema Revisado de Clasificación de Suelos. Para ello, se consideran

mezclas reconstituidas elaboradas con arena Biobío y tres tipos de finos de distinta naturaleza, evaluando la influencia del contenido de finos, del tipo de material incorporado y de la relación de vacíos inicial mediante ensayos triaxiales cíclicos no drenados. El estudio comprende la caracterización de los materiales, la preparación de probetas en condiciones controladas de laboratorio y la interpretación de su comportamiento frente a solicitaciones sísmicas. El alcance del estudio se limita a las condiciones experimentales adoptadas, por lo que no considera variaciones en la demanda cíclica aplicada ni en la morfología de las mezclas, y los resultados se restringen al comportamiento de probetas reconstituidas ensayadas bajo condiciones controladas de laboratorio.

1.4. Metodología de trabajo

El trabajo se organizó en tres etapas principales, orientadas a la caracterización de los materiales, a la ejecución del programa experimental y al análisis de la respuesta observada en función de los parámetros de clasificación. La primera etapa correspondió a la selección y caracterización de los materiales constituyentes, considerando la arena Biobío como material base y tres tipos de finos de distinta naturaleza. En esta fase se determinaron las propiedades físicas, índice y de clasificación de cada material, y se definieron las mezclas a estudiar en función del tipo y contenido de finos.

La segunda etapa estuvo asociada al desarrollo del programa experimental. Para ello, se elaboraron probetas reconstituidas de mezclas arena–finos con distintas relaciones de vacíos iniciales, mediante un método de reconstitución definido para este estudio. Posteriormente, se ejecutaron ensayos triaxiales cíclicos no drenados bajo condiciones controladas de saturación, consolidación y carga, con el propósito de evaluar la generación de presión de poros y la acumulación de deformaciones en las mezclas consideradas.

La tercera etapa correspondió al análisis e interpretación de los resultados. En esta fase, la respuesta de las mezclas se examinó en función de criterios de falla asociados a presión de poros y deformación, y se relacionó con los parámetros físicos, índice y de clasificación de los materiales, con énfasis en el Sistema Revisado de Clasificación de Suelos (SRCS). Sobre esta base, se evaluó la capacidad de dichos parámetros para interpretar la respuesta de las mezclas frente a solicitaciones cíclicas y se contrastó su utilidad con los enfoques actualmente empleados en el estado de la práctica.

1.5. Principales resultados

Los resultados obtenidos muestran que la respuesta cíclica de las mezclas arena-finos evaluados depende de manera conjunta del contenido de finos, del estado inicial y de la naturaleza de la fracción fina, más que de un único parámetro índice. En todos los ensayos, la condición de $\varepsilon_{DA} = 5\%$ fue alcanzada antes que el criterio asociado a $R_u = 1$, lo que indica que, bajo la demanda cíclica impuesta, la acumulación de deformación constituyó el umbral predominante de falla. Se observó además que la mayor diferenciación entre mezclas se concentra en la condición intermedia de contenido de finos y en estado denso, donde materiales pertenecientes a una misma clase general del SRCS desarrollaron respuestas marcadamente distintas tanto en número de ciclos como en nivel de presión de poros al alcanzar la deformación crítica. En contraste, en estado suelto la respuesta tendió a agruparse en rangos más uniformes. Asimismo, los resultados muestran que la sensibilidad eléctrica (S_E) permitió organizar de manera más clara la respuesta observada que el índice de plasticidad (IP), especialmente en las configuraciones transicionales.

1.6. Organización de la memoria de título

Esta memoria de título se estructura en seis capítulos. En el capítulo uno se presentan la motivación del estudio, los objetivos generales y específicos, el plan de trabajo, los principales resultados y la organización del documento. En el capítulo dos se revisan los sistemas de clasificación de suelos, junto con sus antecedentes, limitaciones y principales avances. En el capítulo tres se aborda el fenómeno de licuación, los criterios propuestos para evaluar su susceptibilidad y su evaluación experimental, incluyendo los criterios de falla adoptados. En el capítulo cuatro se describe el programa experimental, y se presentan las características de los suelos y mezclas considerados en la campaña de ensayos. En el capítulo cinco se exponen los resultados obtenidos y su relación con los parámetros índice de los materiales estudiados. Finalmente, en el capítulo seis se sintetizan las conclusiones generales del trabajo.

CAPÍTULO 2: SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

2.1. Introducción

Este capítulo aborda los antecedentes conceptuales y metodológicos de los principales sistemas de clasificación de suelos, los cuales son herramientas fundamentales en ingeniería, ya que permiten organizar materiales con propiedades índice y comportamientos semejantes, facilitando su estudio, identificación e interpretación preliminar. Su relevancia práctica radica en que constituyen un lenguaje común entre profesionales y orientan decisiones iniciales sobre el uso de estos en obras civiles. En este sentido, una clasificación correcta resulta esencial, porque una identificación errónea puede generar sobrecostos, descartar materiales aptos o, por el contrario, aceptar suelos inadecuados para rellenos o aplicaciones constructivas (Moreno-Maroto et al., 2021). En primer lugar, se revisan los antecedentes históricos que dieron las primeras propuestas de clasificación y el desarrollo del *Unified Soil Classification System* (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; USCS según sus siglas en inglés), destacando el papel de la granulometría y los límites de Atterberg. Posteriormente, se examina el *Revised Soil Classification System* (Sistema Revisado de Clasificación de Suelos: RSCS según sus siglas en inglés), cuyo planteamiento incorpora variables asociadas al empaquetamiento, la forma de partícula, la compresibilidad de los finos y la interacción con el fluido de poros, con el propósito de representar de manera más consistente el control mecánico e hidráulico de mezclas grueso–fino.

2.2. Antecedentes

Las primeras propuestas de clasificación de suelos surgieron a partir del estudio de la distribución granulométrica, dada la relativa facilidad con que esta propiedad puede determinarse experimentalmente. No obstante, la falta de consenso derivó en la adopción de múltiples escalas para delimitar las fracciones del suelo. En lo que respecta a la fracción arcillosa, la mayoría de las propuestas coincidieron en fijar el umbral máximo en $2\ \mu\text{m}$ (e.g. Atterberg, 1905; Terzaghi, 1925; Glossop & Skempton, 1945), aunque otros esquemas emplearon un valor de $5\ \mu\text{m}$ y diferenciaron, además, una fracción coloidal por debajo de $1\ \mu\text{m}$ (Goldbeck & Jackson, 1921).

Ante las limitaciones de los enfoques basados exclusivamente en la granulometría, se reconoció que partículas con distribuciones de tamaño prácticamente equivalentes podían exhibir comportamientos

mecánicos e hidráulicos marcadamente distintos (Casagrande, 1948). Esta observación estableció que la granulometría, si bien constituye una propiedad fundamental para la identificación inicial, no resulta suficiente por sí sola para representar adecuadamente la respuesta ingenieril del terreno. En este contexto, la plasticidad se consolidó como un criterio de clasificación particularmente relevante para las fracciones finas, dado que se encuentra directamente influida por la naturaleza y la proporción de los minerales arcillosos presentes. En términos generales, esta propiedad corresponde a la capacidad de deformarse y moldearse sin fracturarse, por lo que su incorporación permitió representar de mejor manera diferencias de comportamiento que no podían ser explicadas únicamente a partir de la distribución granulométrica (Guggenheim & Martin, 1995; Skempton, 1953).

2.3. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos tiene su origen en el Sistema de Clasificación de Aeropistas, desarrollado por Casagrande en 1942 para evaluar suelos destinados a pavimentos militares (Casagrande, 1948). Tras revisiones en 1953 y 1960, el sistema adoptó su denominación definitiva de SUCS (Holtz & Kovacs, 1981), incorporándose progresivamente a normativas internacionales, como la ASTM D2487-17 (2017), y consolidándose como la clasificación de mayor aceptación en ingeniería (Gobins, 2014). Este proporciona un marco ordenado para agrupar los suelos según su respuesta esperada frente a solicitudes de ingeniería, de manera que la experiencia previamente documentada pueda aplicarse de forma eficaz (Holtz & Kovacs, 1981). La granulometría y la plasticidad constituyen las dos propiedades índice fundamentales en las que este se sustenta.

Como criterio primario de separación entre suelos de grano grueso y de grano fino, se utiliza el porcentaje de material que pasa por la malla No. 200 (0.075 mm). La primera categoría corresponde a los materiales en que menos del 50% de su masa atraviesa dicha malla y se subdividen, a su vez, en gravas (G) o arenas (S), según la proporción de la fracción gruesa que queda retenida en la malla No. 4 (4.75 mm). Si más de la mitad de esa fracción es retenida, el suelo se clasifica como grava, de lo contrario, como arena. Desde una perspectiva física, estos umbrales responden a cambios en los mecanismos de interacción a medida que disminuye el tamaño de partícula. Bajo la malla No. 4, las fuerzas capilares comienzan a influir de manera significativa en el comportamiento del material, mientras que, por debajo de la malla No. 200 predominan las interacciones superficiales de origen eléctrico, como las fuerzas de van der Waals y la doble capa difusa. En consecuencia, en las fracciones

finas la clasificación pasa a estar gobernada por la plasticidad, cuantificada a través de los límites de consistencia.

Los límites tienen su origen en los trabajos de Albert Atterberg, quien introdujo el concepto de umbrales de humedad para caracterizar el comportamiento del suelo. Estos umbrales definen tres fronteras —límite líquido (LL), límite plástico (LP) y límite de contracción— que separan cuatro estados del material en líquido, plástico, semisólido y sólido. Casagrande incorporó el LL y el índice de plasticidad ($IP = LL - LP$), a su marco de clasificación, como los dos parámetros con mayor capacidad para diferenciar el comportamiento de los suelos finos. Se observó que, al graficar los valores de IP en función del LL para un amplio conjunto de muestras procedentes de depósitos diversos, los datos correspondientes a un mismo origen geológico tendían a alinearse en bandas de pendiente semejante. Apoyándose en estas tendencias y en la constatación de que los materiales arcillosos exhiben permeabilidad reducida, elevada resistencia al desecarse y considerable tenacidad cuando su contenido de agua se aproxima al límite plástico —rasgos contrarios a los observados en limos y arenas muy finas—, se definió una frontera denominada Línea A, expresada como $IP = 0.73(LL - 20)$. Por encima de esta línea se ubicaron las arcillas inorgánicas, mientras que por debajo quedaron los limos, los suelos orgánicos y las arenas muy finas.

La carta de plasticidad (Figura 2.1) se estructura sobre un espacio cartesiano, donde el eje horizontal indica el LL y el vertical refleja el IP. Este dominio gráfico se encuentra segmentado por tres líneas divisorias principales, la primera de ellas es un límite vertical posicionado en $LL = 50 \%$, el cual subdivide los suelos de baja (L) y alta (H) compresibilidad. La segunda directriz es la Línea A, cuya función es establecer empíricamente la frontera entre las fracciones arcillosas (C) y limosas (M). La tercera, denominada Línea U, define la cota superior válida para resultados experimentales en suelos naturales, rigiéndose por la ecuación $IP = 0.9(LL - 8)$ para valores de LL mayores a 16. Adicionalmente, el sistema define un sector de transición para arcillas limosas, de simbología doble (CL-ML). Esta zona queda delimitada superiormente por la horizontal en $IP = 7$, extendiéndose hasta interceptar la Línea A, sirviendo para catalogar materiales con características mecánicas intermedias. En la categoría de la fracción fina, el prefijo C designa a las arcillas, la letra M a los limos, y la letra O a los suelos orgánicos. La determinación experimental de los límites de consistencia o límites de Atterberg se rige por los procedimientos estandarizados en la ASTM D4318-17e1.

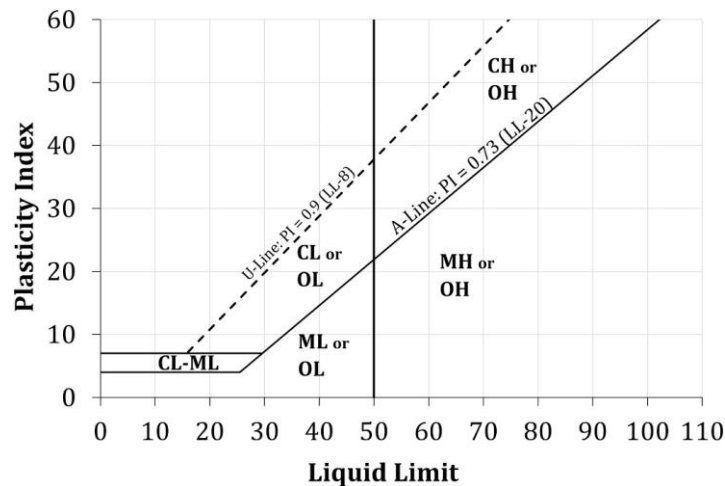


Figura 2.1: Carta de plasticidad suelos finos. Fuente: (ASTM D2487-17, 2017).

Posteriores estudios, indicaron que este método de categorización de la plasticidad presenta diversas limitaciones, particularmente cuando se busca representar de manera adecuada el comportamiento de los finos. Jang y Santamarina (2016) destacan entre las más relevantes las siguientes: (1) que los minerales arcillosos, pese a presentar valores elevados de *LL*, pueden ubicarse dentro de la clasificación de “limos”, lo que pone de manifiesto que la posición respecto de la Línea A no siempre refleja de manera satisfactoria la naturaleza del material; (2) que la determinación de este parámetro considera material de la fracción más gruesa, dado que tradicionalmente se realiza sobre el material que pasa por la malla N° 40, lo que influye en la interpretación de la contribución de la fracción estrictamente fina; y (3) que, en arcillas de alta plasticidad, el *IP* depende en gran medida del valor de *LL*, por lo que su capacidad discriminante resulta más limitada en este tipo de suelos.

2.4. Sistema Revisado de Clasificación de Suelos (SRCS)

Considerando las décadas de avance e información, se propuso una nueva forma de categorización, conocido como el Sistema Revisado de Clasificación de Suelos (SRCS), el cual establece que el comportamiento del suelo está gobernado por el empaquetamiento, la forma de partícula, el estado de los finos y la interacción con el fluido de poros, por lo que las fronteras de clasificación deben derivarse de esas variables y no de porcentajes fijos arbitrarios (Park & Santamarina, 2017).

En esta propuesta se definen umbrales de transición, que permiten diferenciar mezclas dominadas por la fracción gruesa, transicionales y dominadas por finos, a partir de relaciones gravimétricas–

volumétricas y razones de vacíos físicamente alcanzables. Así, la clasificación deja de ser puramente descriptiva y pasa a interpretar quién controla la respuesta mecánica y quién controla el flujo. Para una mezcla binaria grueso–fino, la fracción másica de finos (F_F) y de gruesos (F_C), se estima a partir de la Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2, respectivamente.

$$F_F = \frac{M_F}{M_T} = \frac{M_F}{M_C + M_F} \approx \frac{e_C}{1 + e_C + e_F} \quad (2.1)$$

$$F_C = 1 - F_F \quad (2.2)$$

Donde e_C es la razón de vacíos de la fracción gruesa y e_F la de los finos. Esta ecuación resume la idea de que el umbral de transición no depende solo del porcentaje de finos, sino de cuánto volumen de vacíos generan los granos gruesos y de cuán compactos o sueltos están los finos que ocupan esos vacíos. Sobre esa base se definen un umbral bajo $F_{F|L}$ y un umbral alto $F_{F|H}$, que delimitan los dominios grueso-dominante, transicional y fino-dominante (véase Figura 2.2), estos pueden expresarse según la Ecuación 2.3 y Ecuación 2.4, respectivamente.

$$F_{F|L} = \frac{e_C^{\min}}{1 + e_C^{\min} + e_F^{\max}} \quad (2.3)$$

$$F_{F|H} = \frac{e_C^{\max}}{1 + e_C^{\max} + e_F^{\min}} \quad (2.4)$$

Donde, $e_C^{\min}$ y $e_C^{\max}$ corresponden a las razones de vacíos mínima y máxima de la fracción gruesa, y $e_F^{\min}$ y $e_F^{\max}$ representan las razones de vacíos mínima y máxima de la fracción fina. El umbral inferior representa la condición en que granos gruesos densamente empaquetados son rellenados por finos sueltos, mientras que el umbral superior, corresponde a la condición en que granos gruesos sueltos contienen finos densamente empaquetados.

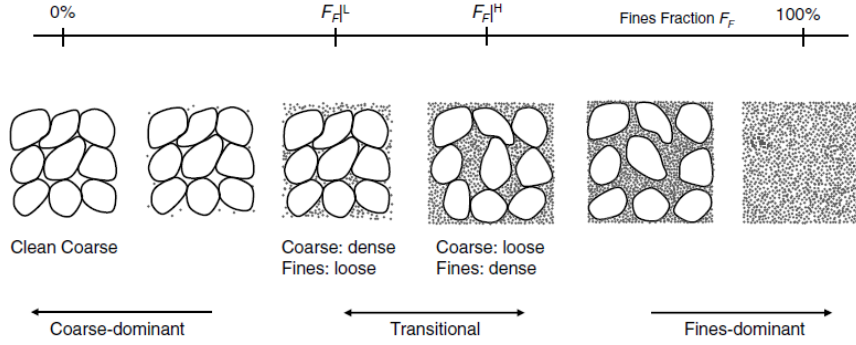


Figura 2.2: Mezclas grueso-fino: fracciones umbral; mezclas dominadas por la fracción gruesa, transicionales y dominadas por la fracción fina; estos esquemas conceptuales se aplican a mezclas grava-arena, grava-finos y arena-finos. Fuente: (Park & Santamarina, 2017).

En mezclas ternarias grava–arena–finos, Park y Santamarina (2017) proponen una formulación análoga, en la que la fracción másica de grava (F_G), la fracción másica de arena (F_S) y la fracción másica de finos (F_F) se expresan como funciones de las razones de vacíos de la grava (e_G), la arena (e_S) y los finos (e_F). En esa formulación, los límites de transición no son una sola línea, sino una zona transicional dentro del triángulo textural, lo que permite representar mejor la complejidad de mezclas naturales. Para la matriz granular (arenas y gravas), se adopta los estados máximos y mínimos de compacidad e_C^{max} y e_C^{min} , a partir de las siguientes correlaciones empíricas (Ecuación 2.5 y Ecuación 2.6), basadas en parámetros de forma (Youd, 1973).

$$e_C^{max} = 0.032 + \frac{0.154}{R} + \frac{0.522}{C_u} \quad (2.5) e_C^{min}$$

$$= -0.012 + \frac{0.082}{R} + \frac{0.371}{C_u} \quad (2.6)$$

Donde, C_u corresponde al coeficiente de uniformidad y R corresponde a la redondez, ambas de cada fracción (Cho et al., 2006). Esta última puede ser obtenida mediante fotos digitales, procesadas mediante un algoritmo computacional generado por Zheng y Hryciw (2015) o Escribano et al. (2025), quienes parametrizan redondez, considerando la tabla de referencia propuesta por Krumbein y Sloss (1963) (Figura 2.3).

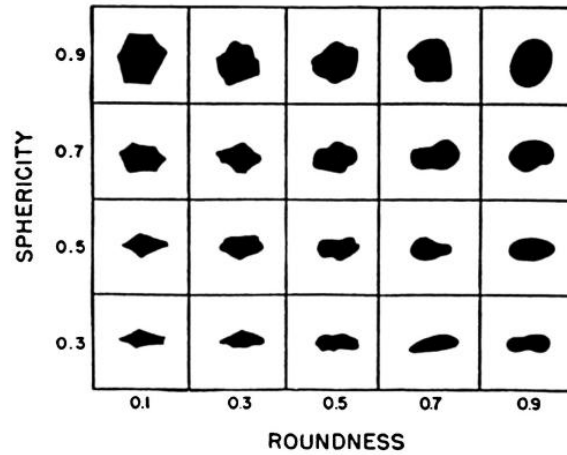


Figura 2.3: Gráfico de Krumbein y Sloss (1963) para la clasificación de la forma de las partículas.

La morfología de las partículas controla no solo la densidad de empaque, sino también la anisotropía, la fábrica, la rigidez y la resistencia. A partir de esta, se distinguen tres escalas principales, correspondientes a esfericidad, redondez y rugosidad, cada una vinculada a mecanismos específicos de formación y a efectos diferenciados sobre la respuesta del material. Como se aprecia en la Figura 2.4, la disminución de la esfericidad y de la redondez se relaciona con variaciones sistemáticas en la porosidad y en los valores extremos de la relación de vacíos. Asimismo, se ha documentado que una mayor irregularidad morfológica conduce a un incremento en e_{max} y e_{min} , una disminución de la rigidez a pequeñas deformaciones, un aumento de la compresibilidad y un mayor ángulo de fricción a volumen constante. Sin embargo, estos efectos no dependen exclusivamente de la redondez y la esfericidad, sino también de otros atributos de forma, como la angularidad, la platitud (carácter laminar o aplanado de la partícula) y la rugosidad (Santamarina & Cho, 2004; Cho et al., 2006).

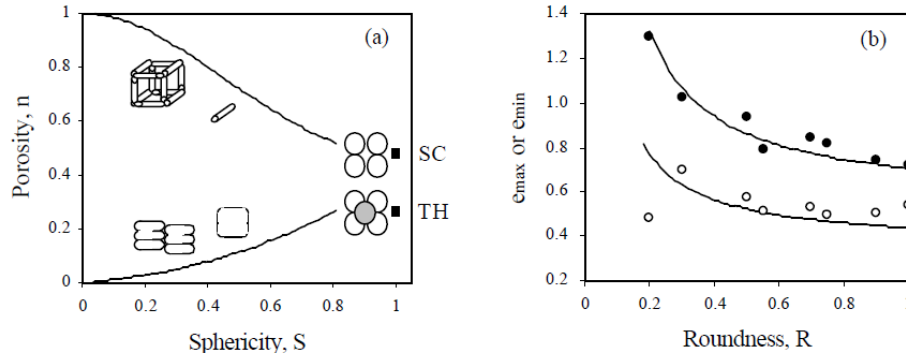


Figura 2.4: Empaquetamiento y forma de partículas. (a) Esfericidad. (b) Efectos de la redondez para diversas arenas uniformes. Fuente: (Santamarina & Cho, 2004).

En lo que respecta a la fracción fina, se adopta una aproximación distinta, ya que su comportamiento no depende únicamente de su contenido, sino también, de su plasticidad, compresibilidad y estado tensional. Para representar el control mecánico, se introducen dos razones de vacíos de referencia: (1) $e_{F|10 \text{ kPa}}$, correspondiente a la razón de vacíos de los finos bajo una condición blanda, asociada a un esfuerzo efectivo de 10 kPa, y (2) $e_{F|1 \text{ MPa}}$, correspondiente a la razón de vacíos de los finos bajo una condición rígida, asociada a un esfuerzo efectivo de 1 MPa. Estas expresiones, propuestas por Chong y Santamarina (2016), se estiman mediante la Ecuación 2.7 y Ecuación 2.8, respectivamente.

$$e_{F|10 \text{ kPa}} = 0.026 LL + 0.07 \quad (2.7)$$

$$e_{F|1 \text{ MPa}} = 0.011 LL + 0.21 \quad (2.8)$$

Donde, LL corresponde al límite líquido de la fracción pasante malla No. 200. Estas expresiones permiten incorporar el efecto de la plasticidad sobre el empaquetamiento y la compresibilidad de los finos. A su vez, se adopta como parámetro adicional de referencia la razón de vacíos de los finos al límite líquido, $e_{F|LL}$, definida por la Ecuación 2.9. Esta expresión se vincula con la razón de vacíos de los finos en un estado de muy baja tensión efectiva, $e_{F|1 \text{ kPa}}$, mediante la aproximación dada en la Ecuación 2.10. En dichas expresiones, G_s denota la gravedad específica de los sólidos. $e_{F|LL} = \frac{G_s LL}{100}$ (2.9)

$$e_{F|1 \text{ kPa}} \approx \frac{5}{4} e_{F|LL} \approx 0.033 LL \quad (2.10)$$

Ambas relaciones permiten conectar el límite líquido con propiedades de estructura y compresibilidad, se establece que dicho índice no es únicamente una medida empírica de consistencia, sino también, un descriptor indirecto del empaquetamiento de la fracción fina. Además del criterio de carga, se incorpora un criterio de control del flujo para identificar cuándo los finos pasan a gobernar la conductividad hidráulica de la mezcla. Para ello, Park y Santamarina (2017) introducen, como parámetro de referencia para la fracción fina en condición de flujo, la razón de vacíos en el límite líquido $e_{F|flow}$ (Véase Ecuación 2.11 y Ecuación 2.12).

$$\lambda = 2 \log(LL - 25) \quad (\lambda \geq 1) \quad (2.11)$$

$$e_{F|flow} = \lambda e_{F|LL} \approx 0.05 LL \log (LL - 25) \quad (2.12)$$

Estas expresiones, propuestas por Park y Santamarina (2017), corresponden a un criterio de control del flujo, a partir del análisis de datos publicados por Locat y Demers (1988), Palomino y Santamarina (2005) y Pennekamp et al. (2010), además de experimentos desarrollados en el propio estudio. Esta formulación se basa en que la fracción fina puede reducir de manera significativa la conductividad hidráulica de una mezcla gruesa antes de asumir el control mecánico, debido a que las partículas finas son arrastradas hacia los estrechamientos del espacio poroso, donde pueden acumularse y bloquear parcialmente el paso del fluido. El sistema distingue explícitamente entre la fracción que controla las propiedades mecánicas y la fracción que controla el flujo.

Esta diferenciación da origen a una de las contribuciones más relevantes del sistema, su nomenclatura dual (véase Figura 2.5). La primera letra indica la fracción que controla las propiedades mecánicas, mientras que la letra entre paréntesis identifica la fracción que controla el flujo, donde G corresponde a grava, S a arena y F a finos. Así, una clasificación como S(F) indica una mezcla con comportamiento mecánico dominado por la arena y la conductividad hidráulica controlada por los finos. Del mismo modo, aparecen clases como G(G), G(F), GS(S), GS(F), SF(F), GF(F), GSF(F) y F(F), entre otras. Este esquema ofrece una resolución interpretativa considerablemente mayor que la disponible en sistemas basados en símbolos únicos.

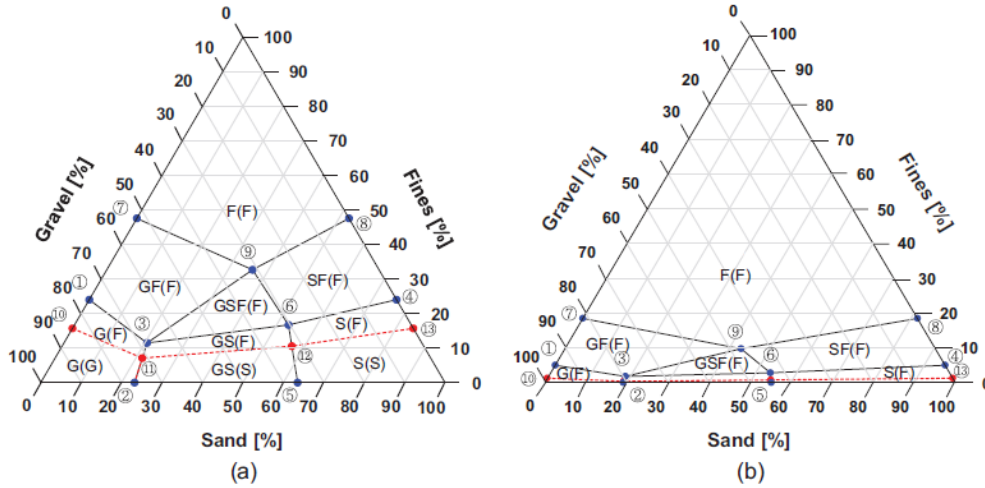


Figura 2.5: Sistema Revisado de Clasificación de Suelos en el diagrama triangular grava–arena–finos.

Fuente:(Castro et al., 2023).

Cuando los finos participan en el control mecánico o hidráulico, la clasificación revisada se complementa con el sistema propuesto por Jang y Santamarina (2016), el cual incorpora explícitamente la sensibilidad a la química del fluido de poros. Esta propuesta utiliza tres límites líquidos determinados sobre la fracción pasante No. 200 y medidos con tres fluidos eléctricamente contrastantes, correspondientes aguas desionizadas, salmuera de 2 MNaCl y kerosene. El agua desionizada favorece la dispersión de las partículas, la salmuera promueve el colapso de la doble capa difusa y el kerosene, por su baja polaridad, permite evaluar el efecto de fuerzas no electrostáticas dominantes en medios no acuosos. Se recomienda realizar estas determinaciones mediante el ensayo de cono de caída, por su mejor repetibilidad respecto del método tradicional de la copa de Casagrande. Asimismo, este ensayo debe efectuarse sobre la fracción que pasa la malla No. 200, debido a que la presencia de partículas no plásticas más gruesas sesga el límite líquido medido.

Con el fin de comparar adecuadamente la respuesta frente a los tres fluidos Jang y Santamarina (2016) introducen cocientes de límites líquidos corregidos, de manera de eliminar el efecto de la gravedad específica del kerosene y de la precipitación de sales durante el secado de las muestras preparadas con salmuera. En su formulación actualizada, estas correcciones se expresan mediante la Ecuación 2.13 y Ecuación 2.14.

$$\left(\frac{LL_{ker}}{LL_{brine}} \right)_{corr} = \frac{LL_{ker}}{LL_{brine}} \frac{1 - c_{brine}LL_{brine}/100}{G_{ker}} \quad (2.13)$$

$$\left(\frac{LL_{DW}}{LL_{brine}}\right)_{corr} = \frac{LL_{DW}}{LL_{brine}} (1 - c_{brine} LL_{brine} / 100) \quad (2.14)$$

Donde LL_{ker} corresponde al límite líquido determinado con kerosene, LL_{brine} al límite líquido determinado con salmuera, LL_{DW} al límite líquido determinado con agua desionizada, c_{brine} a la concentración salina de la salmuera y G_{ker} a la gravedad específica del kerosene. Esta corrección permite interpretar los resultados en términos de interacción suelo–fluido y no como un efecto asociado a diferencias de densidad del fluido o a la precipitación residual de sales.

A partir de dichos cocientes se define la sensibilidad eléctrica S_E (Ecuación 2.15), concebida como una medida sintética de los cambios en límite líquido inducidos por variaciones en conductividad y permitividad del fluido de poros.

$$S_E = \sqrt{\left(\frac{LL_{DW}}{LL_{brine}} - 1\right)^2 + \left(\frac{LL_{ker}}{LL_{brine}} - 1\right)^2} \quad (2.15)$$

La sensibilidad eléctrica se interpreta como la distancia al comportamiento “no sensible” frente a cambios en el fluido de poro. Sobre esta base, Jang y Santamarina (2016) proponen una carta de clasificación de finos en función de LL_{brine} y S_E (véase Figura 2.6), que permite distinguir doce grupos, definidos por niveles de plasticidad y sensibilidad eléctrica. La primera letra identifica la plasticidad —nula, baja, intermedia o alta— y la segunda el nivel de sensibilidad eléctrica —baja, intermedia o alta—.

Como se indica en la Figura 2.7, la articulación entre la carta triangular de clasificación y el esquema de caracterización de finos da lugar a un sistema jerárquico con fundamento físico. En una primera etapa, se define la composición del suelo en términos de grava, arena y finos, y se identifica qué fracción controla la respuesta mecánica y cuál controla el flujo. Posteriormente, cuando la fracción fina resulta mecánica y/o hidráulicamente relevante, se complementa el análisis mediante la clasificación de sus niveles de plasticidad y de sensibilidad a la química del fluido de poros. En este sentido, este enfoque no corresponde a una simple modificación del SUCS, sino a un marco de clasificación ampliado, que integra de manera coherente variables asociadas al empaquetamiento, la

forma de partícula, la plasticidad y la sensibilidad hidroquímica para interpretar el comportamiento de suelo.

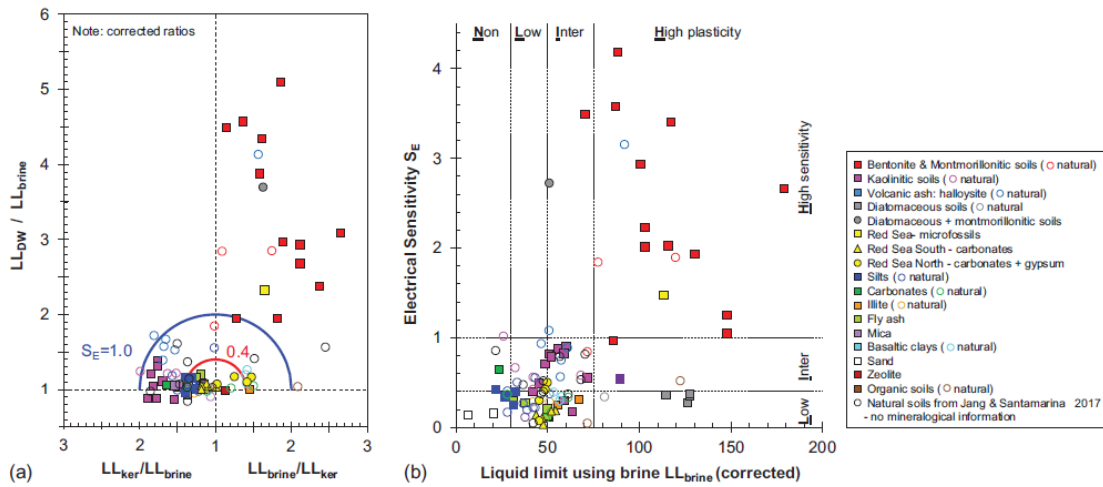


Figura 2.6: Clasificación de finos basada en la sensibilidad a la química del fluido de poros: (a) los límites circulares corresponden a sensibilidades eléctricas $S_E=0.4$ (rojo) y $S_E=1.0$ (azul); y (b) la nomenclatura de dos letras para la clasificación de finos indica la plasticidad del suelo (N, L, I o H) y la sensibilidad eléctrica (L, I o H). Fuente: (Castro et al., 2023).

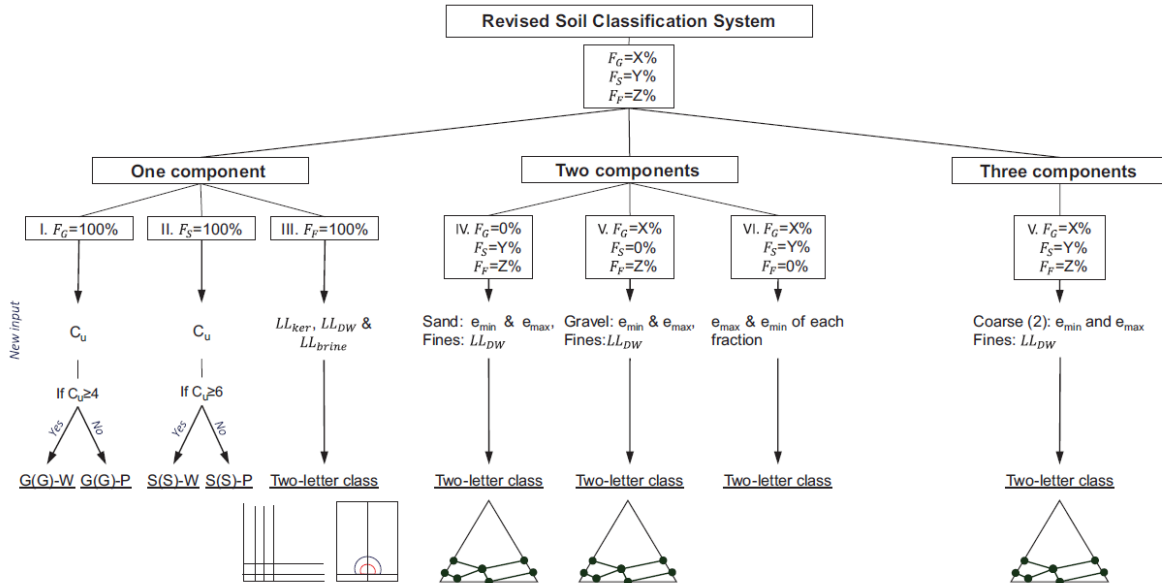


Figura 2.7: Sistema Revisado de Clasificación de Suelos: árbol lógico completo. Fuente: (Castro et al., 2023).

2.5. Conclusiones

La revisión realizada permite concluir que el SUCS, aunque sigue siendo una herramienta ampliamente utilizada para la identificación preliminar del terreno, presenta limitaciones importantes para representar el comportamiento de mezclas grueso–fino. Entre ellas, destaca que no considera la forma de las partículas gruesas, adopta un umbral fijo de 50 % de pasante por la malla No. 200 para definir el control de los finos y no incorpora explícitamente su influencia sobre las propiedades hidráulicas. Frente a ello, el SRCS propone una clasificación más consistente con la física de los suelos, al incorporar el empaquetamiento, la morfología de las partículas, la compresibilidad de los finos y su interacción con el fluido de poros. En este sentido, la clasificación revisada no solo amplía la capacidad descriptiva de los sistemas tradicionales, sino que también incorpora parámetros con potencial para interpretar fenómenos que históricamente han sido evaluados a partir de categorías derivadas del SUCS, como la susceptibilidad a la licuación. Sobre esta base, el capítulo siguiente examina los criterios utilizados para su evaluación, con el fin de analizar cómo estos nuevos parámetros pueden contribuir a una interpretación más consistente del comportamiento de mezclas grueso–fino y suelos transicionales.

CAPÍTULO 3: LICUACIÓN Y CRITERIOS DE SUSCEPTIBILIDAD

3.1. Introducción

Los terremotos ocurridos en Alaska (EE.UU) y Niigata (Japón) en 1964 impulsaron decisivamente el estudio de la licuación, al evidenciar las severas consecuencias sociales, económicas y constructivas que puede generar la pérdida de resistencia del terreno durante un sismo. A partir de estos eventos, se consolidó la necesidad de identificar los depósitos susceptibles a desarrollar este fenómeno y de comprender los mecanismos que gobiernan su respuesta bajo carga sísmica.

En este contexto, el presente capítulo aborda, en primer lugar, los fundamentos del fenómeno de licuación y su evaluación en la ingeniería. Posteriormente, se revisan los principales criterios de susceptibilidad propuestos en la literatura, con el propósito de examinar cómo estos han sido utilizados para orientar la evaluación ingenieril de suelos con finos, particularmente en lo relativo a la selección del procedimiento de análisis más apropiado, y a la estimación preliminar del potencial de pérdida de resistencia. Finalmente, se presenta el ensayo triaxial como herramienta experimental para el estudio de la licuación y la evaluación de la respuesta del suelo frente a carga cíclica.

3.2. Licuación

La licuación es un mecanismo de fallo, que ocurre cuando suelos sueltos (contractantes), en estado saturado, al ser sometidos a esfuerzos de corte (cargas cíclicas o monótonas), disminuyen su esfuerzo efectivo, dado que se le reduce y/o impide el drenaje, por ende, hay un aumento en la presión de poros (Robertson & Fear, 1995), este puede desencadenar grandes daños y/o inestabilidades a la infraestructura civil. Para esta investigación, se abordará desde el contexto sísmico-activo subductivo, en donde el fenómeno es desencadenado por cargas sísmicas.

Seed et al. (2003) propone una secuencia de análisis para la evaluación ingenieril del fenómeno de licuación, la cual se esquematiza en la Figura 3.1, donde (1) se evalúa el potencial de desencadenamiento del fenómeno, (2) una vez establecido que existe riesgo, se analiza la resistencia post-licuación del suelo, (3) si esta no resulta suficiente o aceptable para las condiciones del problema, se estiman las deformaciones y desplazamientos asociados, (4) posteriormente se evalúan las

consecuencias derivadas de estas sobre el desempeño de la infraestructura, y (5) finalmente se definen medidas de mitigación cuando la magnitud de la amenaza así lo justifica.

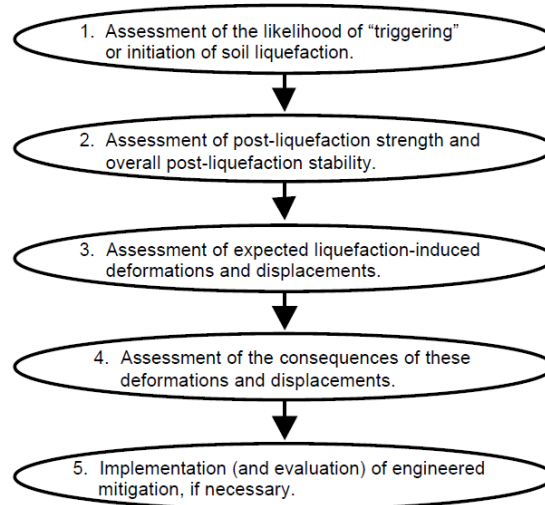


Figura 3.1: Elementos clave de la ingeniería de la licuación de suelos. Fuente: (Seed et al., 2003).

El presente estudio se centra en un sector del primer componente de la ingeniería de la licuación, correspondiente a la evaluación de la susceptibilidad, es decir, a la identificación de los tipos de suelos que pueden desarrollar este fenómeno bajo sollicitación sísmica. En términos generales, los depósitos arenosos relativamente limpios son ampliamente reconocidos como vulnerables a la licuación. Sin embargo, la mayor incertidumbre se concentra en materiales más complejos, como las gravas y las mezclas de arena con finos, entre ellas las arenas limosas y las arenas arcillosas. La evaluación de la susceptibilidad a la licuación constituye una etapa inicial dentro de la caracterización de la respuesta sísmica del terreno, ya que permite establecer si un depósito puede experimentar pérdida de resistencia, ablandamiento o acumulación importante de deformaciones bajo carga cíclica. Armstrong y Malvick (2016) señalan que este análisis preliminar no busca, por sí solo, cuantificar la resistencia cíclica, sino aportar información adicional respecto de qué materiales son más propensos a ablandarse o perder capacidad resistente durante y después del sismo. En ese sentido, los criterios de susceptibilidad deben entenderse como herramientas que orientan la elección de los procedimientos posteriores de evaluación.

Los suelos gravosos pueden desarrollar presión de poros cíclica y, en consecuencia, presentar susceptibilidad a la licuación, de manera análoga a los suelos arenosos. No obstante, su respuesta suele

diferir en dos aspectos relevantes. En primer lugar, estos depósitos tienden a exhibir una mayor permeabilidad, lo que favorece la disipación de las sobrepresiones de poros generadas durante la sollicitación sísmica, y, en segundo lugar, debido al mayor peso de sus partículas, rara vez se depositan en estados extremadamente sueltos, condición que es más frecuente en depósitos arenosos. Sin embargo, esta aparente ventaja hidráulica puede verse reducida o anulada cuando el drenaje se encuentra restringido, ya sea porque el estrato está confinado por materiales más finos y menos permeables, porque los vacíos entre partículas gruesas contienen una fracción fina que dificulta el flujo, o porque el espesor del depósito es tal que la longitud de drenaje requerida durante el evento sísmico resulta excesiva. En estas condiciones, los depósitos gravosos deben ser considerados potencialmente licuables y evaluados en consecuencia (Seed et al., 2003).

Las mezclas de arena con finos pueden exhibir respuestas diferentes en función de sus propiedades índice y de estado. En este sentido, los criterios de susceptibilidad proporcionan una base preliminar para interpretar su comportamiento potencial frente a la carga sísmica, aspecto que se aborda en la sección siguiente.

3.3. Criterios de Susceptibilidad

Dentro de los primeros marcos de estudio, surgió el denominado criterio chino, derivado de Wang (1979) y difundido por Seed e Idriss (1982), representó uno de los primeros intentos sistemáticos para discriminar suelos finos susceptibles a licuación. Según su formulación clásica, un suelo podía considerarse vulnerable si contenía menos de 15 % de partículas menores que 0.005 mm, presentaba un límite líquido menor que 35 y una razón w_c/LL superior a 0.9. Sin embargo, Bray y Sancio (2006) exponen que este criterio presenta deficiencias importantes, ya que muchos de los suelos originalmente considerados en Wang (1979), se ubicaban sobre la Línea A y correspondían a arcillas de baja plasticidad o suelos CL-ML, por lo que la base empírica del criterio no ofrecía información suficiente sobre limos de baja plasticidad. Con los terremotos de Kocaeli (Turquía) y Chi-Chi (Taiwan) de 1999 existió una reestructuración sobre los criterios, tras estos eventos, se documentó un número significativo de casos en los que suelos limosos y arcillosos con más de 15 % de partículas de tamaño arcilla desarrollaron fallas importantes del terreno y daños en edificaciones, aun cuando no cumplían el discriminador granulométrico del criterio chino (Bray & Sancio, 2006).

Seed et al. (2003) propuso un criterio de susceptibilidad orientado a identificar suelos finos potencialmente vulnerables a la licuación cíclica clásica, a partir de su ubicación en la carta de plasticidad y de su contenido de humedad natural relativo al límite líquido (Véase Figura 3.2.a). El esquema distingue tres zonas. La Zona A comprende materiales con $PI \leq 12$ y $LL \leq 37$, los cuales pueden considerarse potencialmente susceptibles cuando w_c supera aproximadamente el 80 % del límite líquido. La Zona B incluye suelos con $PI \leq 20$ y $LL \leq 47$, para los cuales se reconoce una susceptibilidad potencial, aunque con recomendación explícita de verificación mediante ensayos de laboratorio si w_c excede cerca del 85 % de LL . Finalmente, la Zona C agrupa materiales con $PI \geq 20$ o $LL \geq 47$, que en general no se consideran susceptibles a licuación cíclica clásica, aunque deben revisarse respecto de posibles problemas de sensibilidad. Se incorpora la influencia del contenido de finos, siendo aplicable para $FC \geq 20\%$ si $PI > 12$ y para $FC \geq 35\%$ si $PI < 12$, y sitúan la transición entre comportamiento dominado por fracción gruesa y dominado por finos aproximadamente entre 15 % y 35 % de contenido de finos.

Los limos de Adapazari, en Turquía, fueron exhaustivamente estudiados, ya que los suelos que habían licuado en campo no satisfacían típicamente el criterio chino. A partir de ello, se realizó una campaña detallada de investigación con SPT, CPTU, ensayos de propiedades índice y un amplio programa de ensayos cíclicos triaxiales y de corte cíclico simple, a partir de la cual se reformuló la interpretación de la susceptibilidad de suelos finos saturados. Sobre esta base, Bray y Sancio (2006) propusieron un criterio centrado en la plasticidad y en la razón w_c/LL (Véase Figura 3.2.b). Sus resultados mostraron que suelos con $PI \leq 12$ y $w_c/LL \geq 0.85$ eran susceptibles a licuación, mientras que, suelos con $12 < PI \leq 18$ y $w_c/LL \geq 0.8$ eran sistemáticamente más resistentes, aunque todavía susceptibles a movilidad cíclica. En cambio, los materiales con $PI > 18$, ensayados a bajos esfuerzos efectivos de confinamiento, no mostraron susceptibilidad a licuación en el sentido adoptado por los autores. Esta propuesta se apoya simultáneamente en evidencia de campo y en resultados de laboratorio, y a partir de ello, se concluyó que no es la cantidad de partículas de “tamaño arcilla” lo que mejor representa la susceptibilidad, sino el tipo y la cantidad de minerales arcillosos presentes en la matriz.

Adicionalmente, Boulanger e Idriss (2006) plantearon que el problema no debía formularse solo en términos de qué suelos “licuan”, sino en términos de qué procedimientos son los más adecuados para estimar la pérdida de resistencia y las deformaciones en distintos tipos de suelos finos. Su propuesta se basó en la observación de que los materiales finos transitan, en un rango relativamente estrecho de

plasticidad, desde comportamientos *sand-like* a comportamientos *clay-like* (Véase Figura 3.2.c). En los primeros, la respuesta bajo carga cíclica se asemeja más a la de una arena y puede justificarse el uso de correlaciones tipo SPT o CPT, en los segundos, la respuesta se aproxima a la de una arcilla y debe ser evaluada mediante procedimientos de ablandamiento cíclico y resistencia no drenada. Para fines prácticos, se considera *clay-like* a los suelos finos con $PI \geq 7$, con la salvedad de que en materiales CL-ML ese límite podría reducirse aproximadamente a $PI \geq 5$, mientras que los materiales que no cumplen esos umbrales se consideran en el comportamiento contrario.

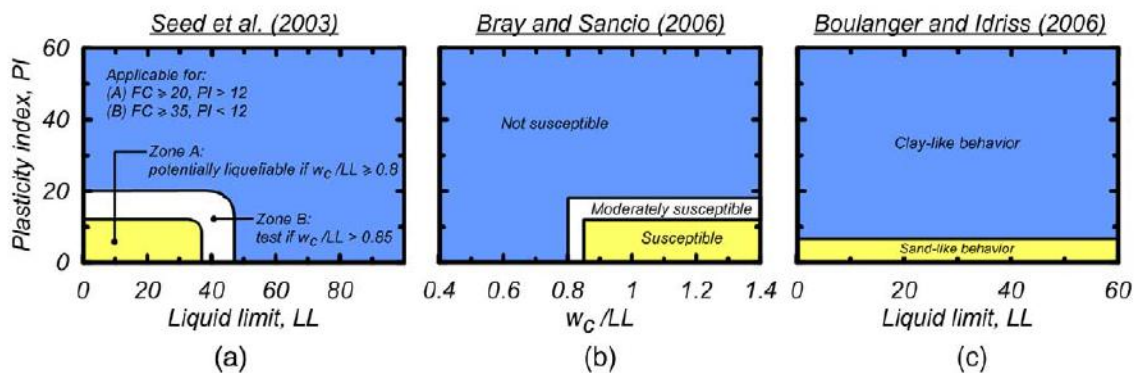


Figura 3.2: Métodos utilizados para determinar la susceptibilidad a la licuación: (a) Seed et al. (2003) (b) Bray y Sancio (2006) y (c) Boulanger e Idriss (2006).Fuente: (Armstrong & Malvick, 2016).

Finalmente, Armstrong y Malvick (2016) integró las propuestas de Seed et al. (2003), Bray y Sancio (2006) y Boulanger e Idriss (2006) dentro de un marco de uso práctico, ilustrado en la Figura 3.3. Estos autores muestran que los criterios de susceptibilidad solo son aplicables de manera directa a suelos *fines-controlled*, es decir, aquellos en que la fracción fina constituye la matriz resistente. Cuando el depósito es *coarse-controlled*, la evaluación debe hacerse mediante procedimientos convencionales de licuación basados en SPT o CPT. Los criterios proporcionan principalmente dos tipos de información: el tipo de procedimiento de ensayo o análisis que conviene emplear y una indicación del potencial de pérdida de resistencia por generación de presión de poros. También, se incorpora una zona de transición considerando el planteamiento de Thevanayagam et al. (2002), para interpretar mezclas arena-finos, en las que la fracción gruesa pierde gradualmente el control de la respuesta del material.

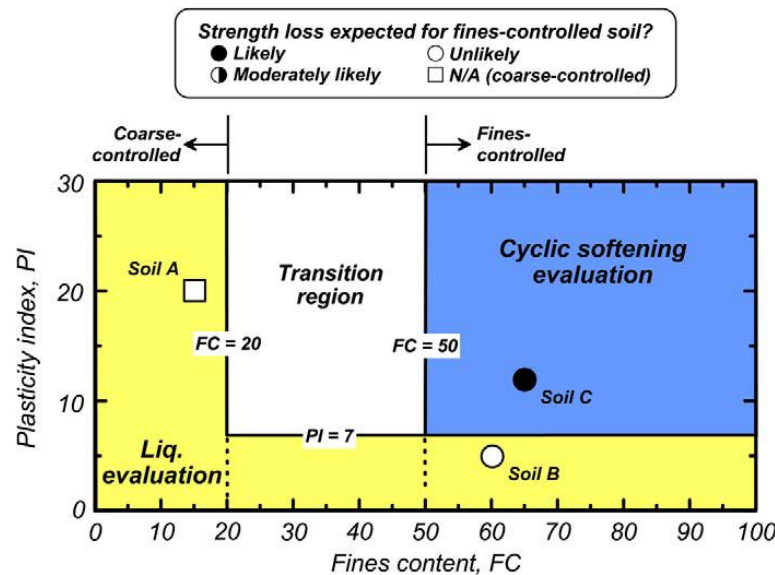


Figura 3.3: Regiones para la evaluación de la licuación, el ablandamiento cíclico y la transición en función del PI y del FC. Fuente: (Armstrong & Malvick, 2016).

3.4. Evaluación experimental de la respuesta a la licuación

El estudio de la licuación y de la respuesta cíclica del suelo exige procedimientos experimentales que permitan observar, bajo condiciones controladas, la evolución de la presión de poros y de las deformaciones inducidas por solicitaciones repetidas. Entre ellos, el ensayo triaxial cíclico no drenado ha ocupado un lugar central en la investigación geotécnica, debido a su capacidad para reproducir aspectos fundamentales del comportamiento del material frente a este tipo de carga.

3.4.1 Ensayo triaxial cíclico no drenado

El ensayo triaxial corresponde a una prueba de laboratorio en la que una probeta cilíndrica de suelo es sometida a un esfuerzo de confinamiento y a una carga axial controlada, con el propósito de evaluar su respuesta esfuerzo-deformación bajo condiciones de carga definidas. En su modalidad cíclica no drenada, la muestra se satura, se consolida y posteriormente se somete a solicitaciones repetidas sin permitir el drenaje, de modo que puedan observarse la generación de presión de poros, la reducción del esfuerzo efectivo y la acumulación de deformaciones durante la carga cíclica (Tatsuoka et al., 1986). Este procedimiento ha sido ampliamente utilizado en la investigación geotécnica para estudiar la resistencia cíclica y la licuación, ya que permite reproducir, en condiciones controladas, aspectos

esenciales del comportamiento del suelo frente a sollicitaciones sísmicas, particularmente en materiales sueltos o susceptibles a pérdida de rigidez y resistencia (Ishihara, 1993; Ghadr et al., 2021).

3.4.2 Criterios de falla

Respecto a la falla por licuación del suelo bajo carga cíclica, Seed y Lee (1966) plantearon que, cuando ocurre licuación, el esfuerzo efectivo y la resistencia al corte del material se reducen hasta valores prácticamente nulos. Posteriormente, (Casagrande, 1975) centró la atención en las características de flujo del suelo licuado y sostuvo que esta conserva una resistencia al corte en estado estacionario, de modo que el daño se manifiesta principalmente en forma de deformaciones, desplazamientos o distorsiones excesivas. Los criterios se agrupan en dos categorías, la primera está basada en la presión de poros, en el cual la licuación se asocia al desarrollo de una sobrepresión de poros equivalente al esfuerzo efectivo inicial de confinamiento, es decir, cuando la razón de presión de poros en exceso (Véase Ecuación 3.1) alcanza el valor unitario.

$$R_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_0} \quad (3.1)$$

Donde, Δu es el incremento de presión de poros generado durante la carga cíclica y σ'_0 es el esfuerzo efectivo inicial de confinamiento. El segundo criterio, está basado en deformación, en el cual la falla se asocia al desarrollo de deformaciones axiales suficientemente grandes, usualmente definidas por una deformación unitaria de amplitud simple del orden de 2–3 % o una deformación de doble amplitud cercana al 5 % (Casagrande, 1975).

Esta elección es consistente con el marco interpretativo discutido por Boulanger e Idriss (2006), quienes señalan que, en materiales de comportamiento *sand-like*, la licuación puede identificarse tanto por el desarrollo de $R_u = 1$, como por el alcance de un nivel especificado de deformación cortante. Arenas saturadas en estado de licuación inicial se asocia históricamente a $R_u = 1$, condición que corresponde a una pérdida transitoria del esfuerzo efectivo, y que dicho estado, suele coincidir con deformaciones de corte del orden de 2–3 %, equivalentes aproximadamente a deformaciones axiales entre 1.4 y 2 % en ensayos triaxiales. Asimismo, destacan que, tras alcanzar ese estado, el material

puede continuar deformándose bajo un régimen de movilidad cíclica, en el cual se desarrollan nuevas deformaciones, aun cuando el suelo recupere parcialmente rigidez por dilatancia.

Considerando que la respuesta de las mezclas arena-finos depende simultáneamente de las propiedades de la arena, de la naturaleza de los finos y de la estructura interna controlada por el contenido de finos, en esta investigación se adoptan ambos criterios de falla, uno ligado a la generación de presión de poros y otro asociado a la acumulación de deformaciones, con el fin de evaluar de manera más completa su comportamiento cíclico.

3.5. Conclusiones

La susceptibilidad a la licuación constituye una etapa clave en la evaluación geotécnica, ya que permite identificar de manera preliminar aquellos depósitos con mayor propensión a desarrollar pérdida de resistencia o deformaciones significativas bajo carga sísmica. Asimismo, la evolución de los criterios evidencia un cambio desde enfoques principalmente empíricos hacia propuestas con mayor sustento mecánico, en las que la plasticidad, el contenido de humedad y el rol estructural de los finos adquieren una importancia central.

Entre los criterios revisados, la propuesta de Armstrong y Malvick (2016) destaca por integrar de forma más completa los enfoques previos dentro de un marco de aplicación práctica. Su principal fortaleza radica en que no solo orienta la selección del procedimiento de evaluación más adecuado, sino que también incorpora una zona de transición para mezclas arena-finos, lo que permite representar con mayor realismo la influencia del contenido de finos dentro de una matriz granular.

Los parámetros tradicionalmente utilizados para evaluar la susceptibilidad presentan una capacidad limitada para describir suelos transicionales y mezclas complejas, por ello, resulta necesario avanzar hacia marcos interpretativos que incorporen variables con mayor significado físico.

CAPÍTULO 4: PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1. Introducción

Este capítulo presenta la metodología experimental empleada para caracterizar los materiales y evaluar la respuesta cíclica de mezclas arena-finos mediante ensayos triaxiales no drenados. En primer lugar, se describen los materiales utilizados y sus principales propiedades índice. Luego, se expone el programa experimental, la definición de las mezclas estudiadas y el procedimiento de reconstitución de las probetas.

4.2. Mezclas arena-finos

En este estudio se utilizó como material base una arena exenta de finos, comúnmente denominada arena Biobío, previamente empleada en investigaciones y vinculada a zonas con ocurrencia de licuación. Los finos evaluados correspondieron a tres tipos de finos, caracterizados en este estudio en la sección 4.2.2.

4.2.1 Descripción arena Biobío

La arena Biobío corresponde a un depósito aluvial cuaternario de procedencia volcánico-basáltica, acumulado en grandes depósitos próximos a la desembocadura del río Biobío (Dobry & Poblete, 1966). Su formación se enmarca en la dinámica fluvial que ha modelado históricamente este sistema, dando lugar a una secuencia de depósitos asociados a procesos de transporte y sedimentación. En el área de estudio, estos depósitos han experimentado una evolución geomorfológica sostenida, vinculada a antiguas crecidas, inundaciones y cambios en el cauce del río, incluyendo brazos hoy inexistentes (Cuitiño Gajardo, 2016).

Escribano et al. (2025) describe la arena Biobío como una arena aluvial de base silíceas, mal gradada y con bajo contenido de finos no plásticos. Para este material, los autores reportan un tamaño medio de grano (D_{50}) de 0.69 mm y una gravedad específica de sólidos (G_s) de 2.79. Asimismo, en ese estudio la morfología de las partículas fue evaluada mediante descriptores de forma, entre ellos, la

redondez (R), definida en base a Cho et al. (2006) lo que permitió clasificar sus partículas entre angulares y subangulares.

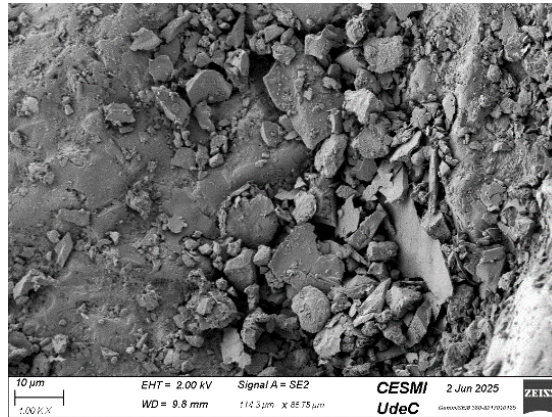


Figura 4.1: Microfotografía SEM arena Biobío.

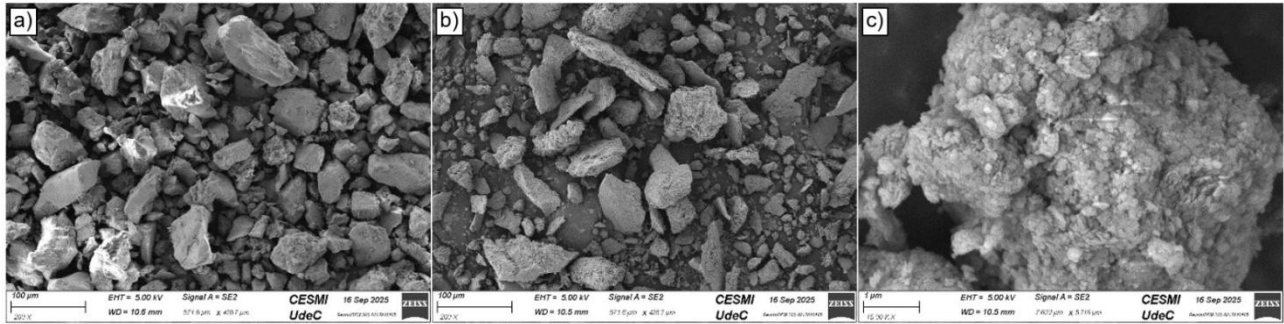
La relevancia de esta arena como material de estudio se fundamenta en su respuesta frente a eventos sísmicos de gran magnitud, la cual ha quedado reflejada en la ocurrencia de fenómenos de licuación y asentamientos en el área de Concepción durante el terremoto del Maule de 2010 (M_w 8.8) (Montalva et al., 2022; Saldaña-Sotelo et al., 2024). Por ello, constituye un material de interés para investigar la respuesta cíclica y la pérdida de estabilidad en suelos arenosos sometidos a carga sísmica.

4.2.2 Descripción finos

Se emplearon tres tipos de finos, correspondientes a un limo de baja plasticidad proveniente de la fracción fina de la arena Biobío, un limo de baja plasticidad proveniente de la fracción fina de un suelo residual granítico y una arcilla de alta plasticidad. Para efectos de este trabajo, estos materiales se denominarán MB, MG y CS, respectivamente. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los materiales MB y MG se clasifican como ML, mientras que el material CS se clasifica como CH. La tabla 4.1 resume la caracterización de propiedades de los finos, incluyendo los valores de límite líquido, determinados a partir de soluciones de diferente constante dieléctrica previamente mencionadas, los valores de S_E y la categorización en la carta propuesta para la clasificación de granos finos, de acuerdo con Jang y Santamarina (2016). Complementariamente, la Figura 4.2 presenta imágenes obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) de cada uno de los finos evaluados, con el fin de ilustrar sus características morfológicas.

Tabla 4.1: Propiedades índice y clasificación de los finos evaluados según Jang y Santamarina (2016).

Fino	LL_{dw}	LL_{brine}	LL_{ker}	S_E	Clasificación
MB	33	32	32	0.48	LL
MG	44	42	52	0.13	LI
CS	64	65	53	0.3	IL

**Figura 4.2: Microfotografía SEM: (a) Fino MB, (b) Fino MG y (c) Fino CS.**

4.3. Programa de Ensayos

El programa experimental de la presente investigación contempló el ensayo de probetas reconstituidas de mezclas arena–finos, definidas sistemáticamente para evaluar la influencia de la relación de vacíos inicial, el tipo de fino y su proporción gravimétrica en la matriz. Para efectos de nomenclatura, las mezclas elaboradas con arena Biobío como material base, combinadas con limo de la arena Biobío, limo de maicillo residual y arcilla de alta plasticidad, se designan como BBMB, BBMG y BBCS, respectivamente. Los contenidos de finos (FC) considerados en las series experimentales corresponden a 15%, 20% y 35%. Las curvas de distribución granulométrica de cada mezcla se presentan en la Figura 4.3, mientras que sus propiedades físicas e índices de estado se resumen en la Tabla 4.2. La gravedad específica de sólidos G_s se determinó conforme a la ASTM D854-23, los valores de $e_{mín}$ y $e_{máx}$ se obtuvieron según la norma japonesa JGS 0161-2009 (JIS A 1224), la distribución granulométrica, incluido el tamaño medio de grano D_{50} , se estableció de acuerdo con ASTM D6913/D6913M-17, y los parámetros de consistencia, correspondientes al límite líquido (LL) y al índice de plasticidad (IP), se determinaron conforme a ASTM D4318-17e1. La Figura 4.4 muestra la posición de las mezclas analizadas dentro del criterio de susceptibilidad propuesto por Armstrong y Malvick (2016).

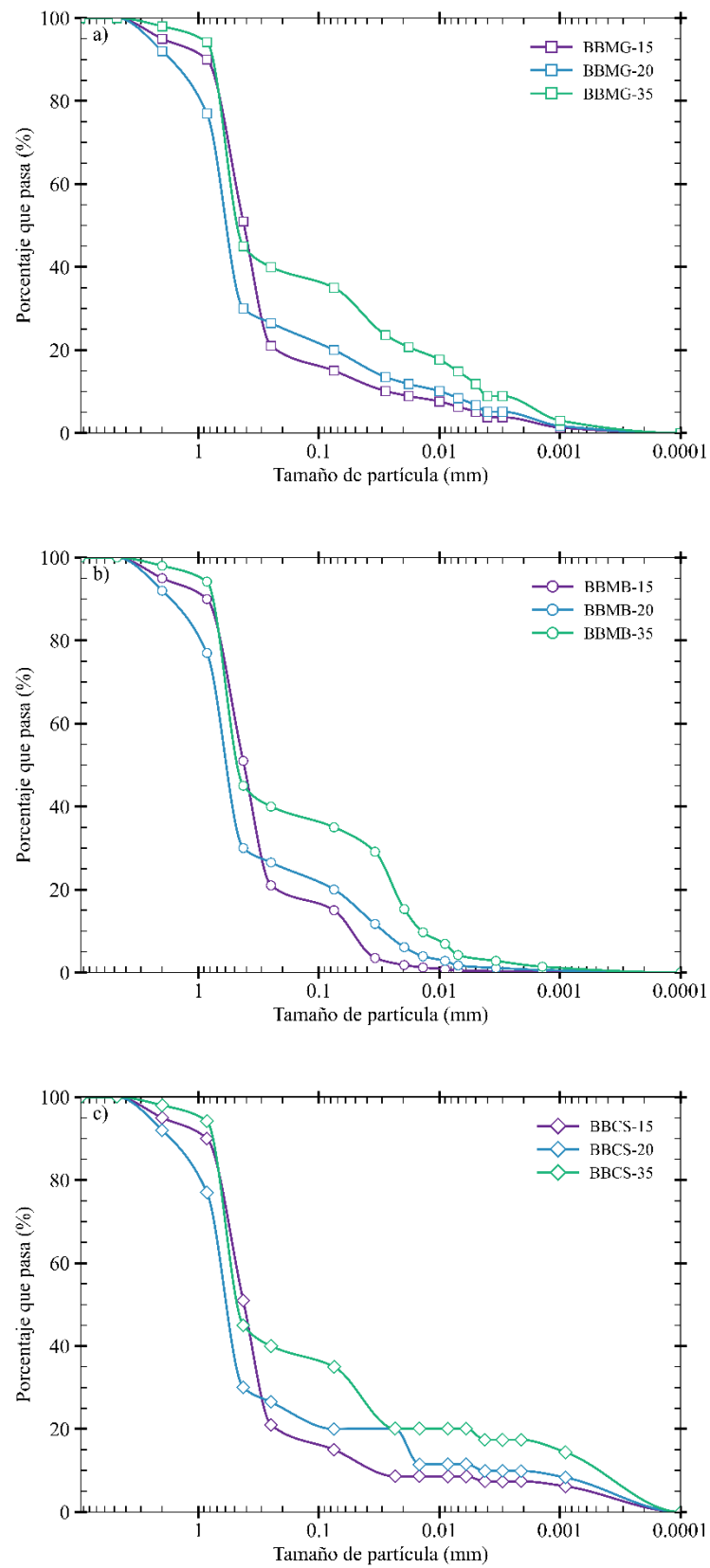
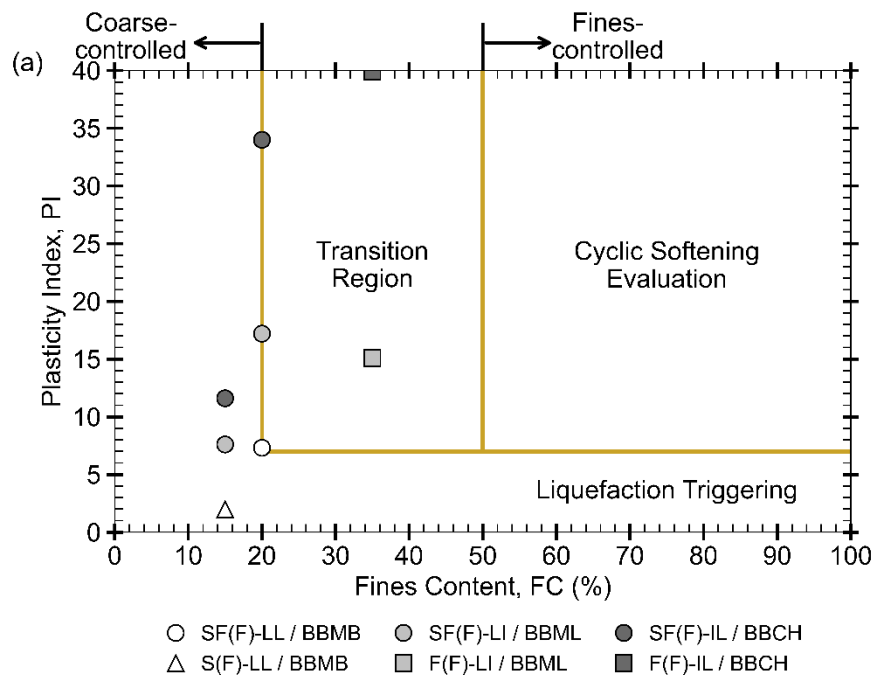


Figura 4.3: Curvas de distribución granulométrica: (a) Mezcla BBMB, (b) Mezcla BBMG y (c) Mezcla BBCS.

Tabla 4.2: Propiedades físicas básicas de las mezclas arena-finos ensayadas.

Gradación	FC (%)	G_s	$e_{mín}$	$e_{máx}$	D_{50} mm	LL	IP	SRCS
BBMB-15	15	2.9	0.46	0.85	0.42	22.6	2	S(F)
BBMB-20	20	2.75	0.33	0.67	0.57	30.5	7.3	SF(F)
BBMB-35	35	2.78	0.43	0.83	0.46	34	8	SF(F)
BBMG-15	15	2.78	0.43	0.85	0.42	21.2	7.6	SF(F)
BBMG-20	20	2.67	0.44	0.79	0.57	33.5	17.2	SF(F)
BBMG-35	35	2.62	0.44	0.96	0.46	36.3	15.1	F(F)
BBCS-15	15	2.77	0.41	0.9	0.42	29	11.6	SF(F)
BBCS-20	20	2.75	0.42	0.9	0.57	51	34	SF(F)
BBCS-35	35	2.68	0.51	1.14	0.46	57.3	39.9	F(F)

**Figura 4.4: Ubicación de las mezclas estudiadas dentro del criterio de susceptibilidad propuesto por Armstrong & Malvick (2016).**

4.4. Métodos de Reconstitución

Las probetas fueron reconstituidas con relaciones de vacíos variados, mediante el método de compactación húmeda, ampliamente utilizado en la preparación de muestras para ensayos triaxiales en arenas y mezclas arena-finos (e.g. Ishihara, 1993; Ladd, 1974; Mulilis et al., 1977; Tatsuoka et al.,

1986). Con el propósito de limitar la variación de densidad a lo largo de la altura de la muestra, se adoptó el procedimiento de subcompactación propuesto por Ladd (1978), el cual considera la compactación de las capas inferiores con una energía progresivamente menor que la aplicada en las superiores, de modo de compensar el efecto de densificación inducido durante la formación secuencial de la probeta. Las relaciones de vacíos iniciales (e) consideradas fueron variables y estuvieron comprendidas, entre 0.45 y 0.80, según la mezcla evaluada, sobre esta base, se establecieron dos marcos comparativos, correspondientes a condiciones de baja y alta densidad. Las muestras reconstituidas fueron cilíndricas, con 50 mm de diámetro y 105 mm de altura.

4.5. Ensayo Triaxial

Los ensayos se realizaron conforme a las normativas ASTM D5311/D5311M-25. La saturación de las probetas se inició mediante el paso de dióxido de carbono (CO_2), a través de la línea de drenaje inferior durante aproximadamente 20 min, con el propósito de desplazar el aire atrapado en el interior de la muestra y posteriormente, se hizo circular agua desairada en dirección descendente. En la etapa posterior, se incrementó gradualmente la contrapresión hasta alcanzar la saturación completa, la cual fue verificada mediante el parámetro B de Skempton (Véase Ecuación 4.1), adoptándose como criterio de aceptación un valor superior a 0.95.

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3} \quad (4.1)$$

Donde Δu es el incremento de presión de poros y $\Delta \sigma_3$ es el incremento del esfuerzo total de confinamiento. Una vez verificado dicho criterio, las probetas fueron consolidadas isotrópicamente hasta un esfuerzo efectivo de confinamiento (σ'_c) de 100 kPa, para posteriormente ser sometidas a una sollicitación sinusoidal de amplitud constante y frecuencia de 0.1 Hz.

Se adoptó una razón de esfuerzo cíclico (CSR) de 0.4, considerada representativa de sollicitaciones sísmicas asociadas a eventos de subducción. Este parámetro se define según la Ecuación 4.2.

$$CSR = \frac{\sigma_d}{2\sigma'_c} \quad (4.2)$$

Donde, σ_d corresponde al esfuerzo desviador cíclico máximo aplicado. La elección de este nivel de carga es coherente con valores empleados en estudios previos sobre susceptibilidad a la licuación bajo este tipo de escenario sísmico, los cuales se presentan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3: Valores de CSR compilados de la literatura para este estudio.

Referencia	Razón de esfuerzo cíclico (CSR)
Bray y Sancio (2006)	0.3 - 0.4 - 0.5
Boulanger e Idriss (2006)	0.18 - 0.3
Stuedlein et al. (2023)	0.13 - 0.48

4.6. Conclusiones

Este capítulo revisó los fundamentos metodológicos del programa experimental empleado para evaluar la respuesta cíclica de mezclas arena-finos y analizar su relación con parámetros de clasificación física y composicional, particularmente con aquellos asociados al Sistema Revisado de Clasificación de Suelos. La caracterización de la arena base, de los finos y de las mezclas, junto con la definición sistemática del contenido de finos, la relación de vacíos inicial y el tipo de material incorporado, permitió establecer una base consistente para examinar la influencia de estas variables sobre la respuesta del material frente a una demanda cíclica. Asimismo, la preparación controlada de las probetas mediante compactación húmeda con subcompactación contribuyó a reducir la heterogeneidad interna de las muestras y a mejorar la representatividad de los resultados experimentales.

Del mismo modo, la metodología de ensayo adoptada, basada en triaxiales cíclicos no drenados con control de saturación, consolidación y carga, proporcionó un marco adecuado para estudiar la evolución de la presión de poros y el desarrollo de deformaciones en mezclas. La incorporación de parámetros índice, de estado y de clasificación, tanto del SUCS como del SRCS, aparte de describir los materiales estudiados, permitió establecer una base comparativa para interpretar su respuesta mecánica frente a solicitaciones sísmicas. En conjunto, el procedimiento descrito constituye una metodología experimental replicable para investigar la relación entre clasificación de suelos y comportamiento cíclico en mezclas arena-finos, y proporciona el fundamento metodológico para el análisis de resultados desarrollado en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos triaxiales cíclicos no drenados, realizados sobre mezclas de arena con finos, con el propósito de evaluar la influencia del contenido de finos, del estado inicial y de las propiedades de la fracción fina en la respuesta cíclica de los materiales estudiados. Para ello, se integran distintos indicadores de comportamiento, entre ellos la evolución del esfuerzo desviador cíclico en función de la deformación axial, las trayectorias de esfuerzos efectivos, la generación de la razón de presión de poros en exceso y la acumulación de deformación axial con el número de ciclos. Esta visión conjunta permite examinar de manera más completa los mecanismos desarrollados durante la sollicitación cíclica, particularmente en mezclas que se sitúan en regímenes transicionales, donde la respuesta no puede interpretarse adecuadamente a partir de un único parámetro o criterio de falla.

En las secciones siguientes, se presenta primero una síntesis global de los ensayos ejecutados y de los comportamientos identificados a partir de los parámetros de falla. Posteriormente, se analiza la influencia del contenido de finos y del estado inicial sobre la respuesta cíclica, considerando tanto el número de ciclos requerido para alcanzar $\varepsilon_{DA} = 5\%$, como la razón de presión de poros en exceso (R_u) asociada a dicha condición. Finalmente, se examina la respuesta de las mezclas en función de variables de clasificación de la fracción fina, con el fin de describir cómo estas se relacionan con la evolución de la presión de poros y con la acumulación de deformación en los distintos estados, tipo y contenidos de finos evaluados.

5.2. Resultados de los Ensayos Triaxiales Cíclicos No Drenados

En el Anexo 5.1 se presenta la respuesta cíclica de los ensayos triaxiales ejecutados, mediante la descripción integrada de la evolución del esfuerzo desviador cíclico en función de la deformación axial, las trayectorias de esfuerzos efectivos, la generación de la razón de presión de poros en exceso y la acumulación de deformación axial, estas dos últimas en función del número de ciclos de carga. Los especímenes se identifican mediante una nomenclatura del tipo BBSCS-15-E45, donde la primera

parte corresponde al material base y al tipo de fino incorporado, 15 representa el contenido de finos (FC) expresado en porcentaje, y E45 corresponde a la relación de vacíos inicial (e) de la mezcla.

En todos los casos, el criterio de falla por deformación fue alcanzado antes que el criterio asociado a la presión de poros, lo que refleja la elevada demanda cíclica impuesta durante los ensayos. No obstante, este resultado no permite concluir que todas las probetas hayan experimentado un mismo mecanismo de inestabilidad, ya sea por ablandamiento cíclico o por movilidad cíclica. Por el contrario, el análisis conjunto de la respuesta observada sugiere que los mecanismos de falla difieren entre ensayos, por lo que su identificación debe sustentarse en la interpretación integral de cada registro y no únicamente en el orden de ocurrencia de los criterios de falla.

A partir de estos resultados, se observó que un conjunto de ensayos presentó licuación, evidenciada por una rápida generación de presión de poros, una marcada disminución de la tensión efectiva y el desarrollo acelerado de deformaciones en pocos ciclos, particularmente en configuraciones más sueltas de las series BBSC, BBMB y BBMG. Asimismo, se identificaron casos de movilidad cíclica, en los que la muestra mantuvo cierta capacidad de recuperación por dilatación antes de alcanzar la falla, desarrollando trayectorias de esfuerzos más progresivas y una acumulación de deformación menos abrupta, como se apreció en BBSC-15-E45 y BBMG-35-E45. Por otra parte, algunos ensayos mostraron un comportamiento más consistente con ablandamiento cíclico, caracterizado por una degradación gradual de la rigidez y de la resistencia, como ocurrió en BBSC-20-E45 y BBMG-15-E45. En el último caso, se advierte una discrepancia entre la respuesta cíclica observada experimentalmente y la predicción derivada del criterio de susceptibilidad, ya que la mezcla BBMG-15-E45 fue situada dentro de un dominio asociado a licuación, por ende, dicho criterio no representó adecuadamente el carácter intermedio de la respuesta desarrollada, el cual se ajusta de manera más coherente a la clasificación SRCS asignada a la mezcla. Las mezclas con composiciones cercanas pueden desarrollar respuestas mecánicas distintas, por lo que la identificación del comportamiento cíclico debe sustentarse en el análisis integral de cada ensayo.

5.3. Resultados de la influencia del estado inicial y del contenido de finos en la respuesta cíclica de las mezclas

La Figura 5.1 expone la respuesta ante el criterio de deformación, considerando el efecto de la densidad, por medio del número de ciclos para alcanzar $\varepsilon_{DA} = 5\%$, denotado en adelante como $N_{\varepsilon_{DA}=5\%}$, donde el estado denso configura una respuesta más variada, que su contraparte. Los puntos resaltados en amarillo corresponden a mezclas que se clasifican en *Transition Region*, las restantes se enmarcan en *Liquefaction Triggering*, según el criterio de Armstrong & Malvick (2016).

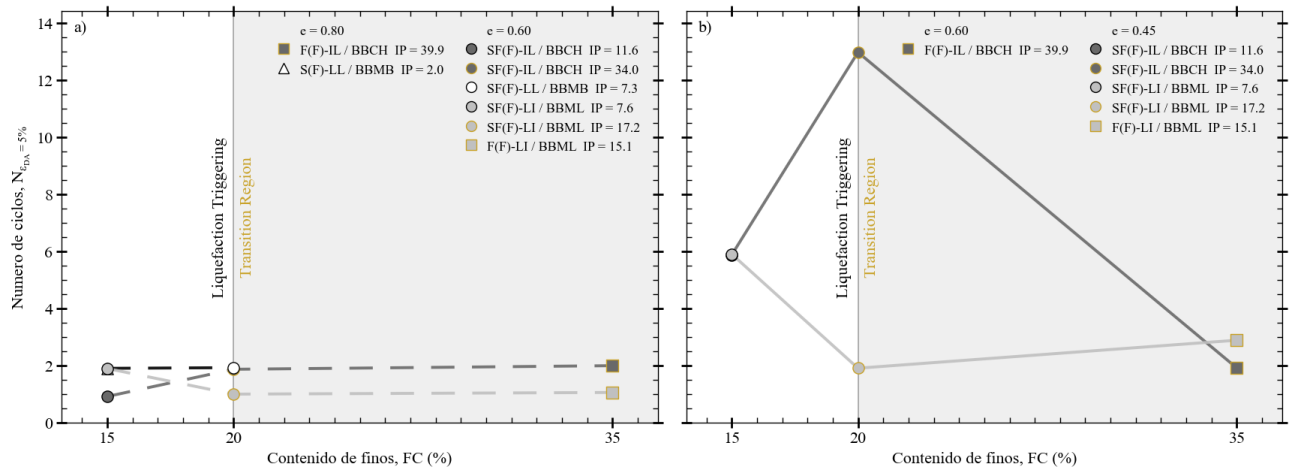


Figura 5.1: Variación de $N_{\varepsilon_{DA}=5\%}$ en mezclas arena-finos en función de FC y estado inicial.

En el estado denso, se advierte que para $FC = 15\%$, la respuesta es semejante entre las mezclas, ya que $N_{\varepsilon_{DA}=5\%}$ se concentra aproximadamente entre 5 y 6 ciclos. En este nivel de finos, aunque las mezclas difieren en parámetros asociados al SUCS, como el índice de plasticidad, y en su posición dentro del marco transicional del SRCS, la cantidad de ciclos requerida para alcanzar la deformación crítica no cambia de manera importante. Sin embargo, al aumentar el contenido de finos a $FC = 20\%$, la diferenciación entre las dos mezclas evaluadas, BBMG-20 y BBCH-20, se vuelve marcada y contrastante. En esta condición, una mezcla alcanza $\varepsilon_{DA} = 5\%$ en torno a 2 ciclos, mientras otras requieren aproximadamente entre 13 y 15 ciclos. Así, dentro de una misma clase general $SF(F)$, la respuesta se separa de manera significativa en términos de deformación acumulada, lo que pone de manifiesto que el comportamiento transicional puede abarcar respuestas contrastantes. Para la primera mezcla, el aumento de los finos MG, implicó tener una acumulación de deformación más temprana, mientras que, los finos CS, tendieron a retardar el desarrollo de deformación. Al incrementar la fracción fina hacia $FC = 35\%$, el comportamiento vuelve a aproximarse entre mezclas, en el sentido de que los valores de $N_{\varepsilon_{DA}=5\%}$ dejan de exhibir la gran dispersión observada en $FC = 20\%$. En la Figura 5.1, las mezclas con mayor contenido de finos tienden nuevamente a converger hacia pocos

ciclos para alcanzar $\varepsilon_{DA} = 5\%$, del orden de 1 a 2 ciclos, en el caso del estado suelto, mientras que en el estado denso la separación relativa igualmente resulta menor. Se observa que desde configuraciones $S(F)$ o $SF(F)$ hacia a $F(F)$, se reduce la singularidad observada en la zona estrictamente transicional, haciendo que las mezclas vuelvan a presentar respuestas más parecidas entre sí.

En el estado suelto, por el contrario, $N_{\varepsilon_{DA}=5\%}$ exhibe poca variación con el aumento del FC. Para $FC = 15\%$, $FC = 20\%$ y $FC = 35\%$, la mayoría de las mezclas alcanza la deformación crítica en aproximadamente 1 a 2 ciclos, por lo que el incremento de finos no introduce una diferenciación tan visible, como la observada en estado denso. Cuando la estructura inicial es más suelta, la mezcla pierde rápidamente su capacidad resistente frente a la acumulación de deformaciones, y las diferencias asociadas a LL , IP o a la clase SRCS, quedan parcialmente subordinadas al efecto del estado inicial.

Al considerar la razón de exceso de presión de poros al momento de alcanzar la condición $\varepsilon_{DA} = 5\%$, la Figura 5.2 indica que el mayor contraste en R_u se registra en el estado denso. Para $FC = 15\%$, los valores de R_u presentan dispersión dentro de un intervalo acotado. En $FC = 20\%$, la diferenciación entre mezclas alcanza su máxima expresión, en concordancia con la separación observada previamente en $N_{(\varepsilon_{DA}=5\%)}$. Para $FC = 35\%$, los valores de R_u vuelven a aproximarse, concentrándose en el rango 60 %-68%.

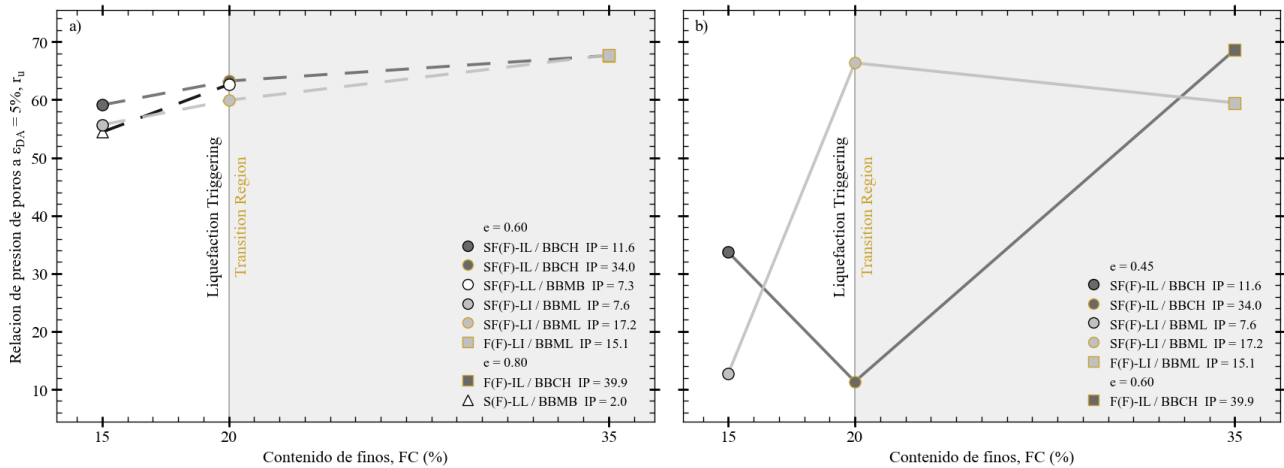


Figura 5.2: Variación de R_u en $\varepsilon_{DA} = 5\%$ en mezclas arena-finos en función de FC y del estado inicial.

En el estado suelto, se muestra una respuesta más uniforme. Para $FC = 15\%$, $FC = 20\%$ y $FC = 35\%$, los valores de R_u se sitúan mayoritariamente entre aproximadamente 55 y 68, por lo que el

incremento de FC no modifica de manera sustantiva el nivel de presión de poros en la deformación crítica.

5.4. Resultados de la respuesta cíclica de las mezclas en función de SRCS

La Figura 5.3 expone que la mayor variabilidad de comportamiento se concentra en la clase transicional $SF(F)$, mientras que las mezclas clasificadas como $F(F)$ presentan respuestas mucho más consistentes. En esta última, donde los finos controlan tanto la mecánica como el flujo, la razón de presión de poros en exceso al alcanzar $\varepsilon_{DA} = 5\%$ se agrupa con baja dispersión en torno a 65–70, y el número de ciclos necesario para alcanzar dicho umbral, $N_{\varepsilon_{DA}=5\%}$, se concentra aproximadamente entre 1 y 2 ciclos, lo que indica una respuesta relativamente uniforme.

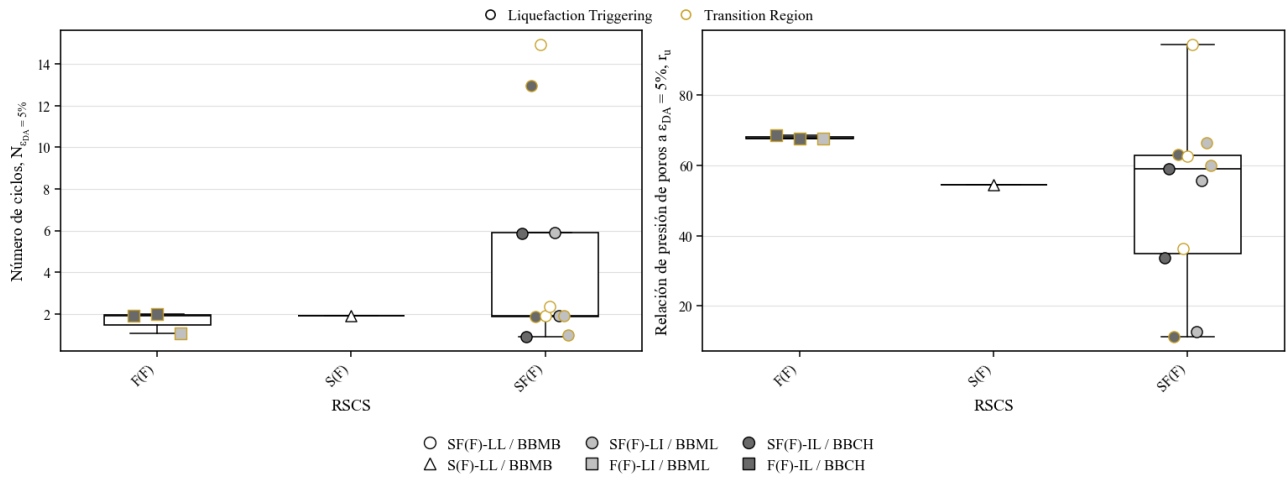


Figura 5.3: Diagramas de cajas de $N_{\varepsilon_{DA}=5\%}$ y de R_u al alcanzar $\varepsilon_{DA} = 5\%$, en función de la clasificación estructural del SRCS.

La mezcla $SF(F)$ presenta la mayor dispersión en ambos parámetros, con valores de R_u que varían entre 10 y 91 ciclos, y con $N_{\varepsilon_{DA}=5\%}$ que abarca desde 1 a 15 ciclos. Las mezclas transicionales no responden de manera intermedia simple, sino que concentran una heterogeneidad mecánica significativa, en la que materiales agrupados dentro de una misma clase SRCS pueden alcanzar $\varepsilon_{DA} = 5\%$ bajo estados de presión de poros y velocidades de acumulación de deformación muy distintos. La transición estructural tiene un efecto directo sobre la manifestación de la inestabilidad cíclica y la clase $SF(F)$ constituye el dominio más sensible para analizar la competencia entre fracción gruesa y fina. La mezcla $S(F)$ es un valor individual, por ende, no hay mayor análisis en este aspecto. Dado

que la mezcla clasificada como $S(F)$ corresponde a un único valor, no es posible desarrollar un análisis comparativo más amplio para esta categoría.

La Figura 5.4 presenta la variación de los valores de R_u al alcanzar $\varepsilon_{DA} = 5\%$, en función del índice de plasticidad (IP) y de la sensibilidad eléctrica (S_E), para distintos tipos, FC y estados iniciales. En la representación en función de IP , se observa que, en términos generales, las mezclas no presentan diferencias marcadas entre estados para los contenidos bajo y alto de finos, manteniéndose valores relativamente próximos dentro de cada serie. La principal excepción corresponde a la condición con $FC = 20\%$, donde las respuestas se contrastan al cambiar la densidad inicial. La distribución de los datos en función de IP evidencia que la respuesta depende simultáneamente del contenido de finos y de la condición inicial de la mezcla, siendo el contenido intermedio el que concentra la mayor sensibilidad al cambio de estado.

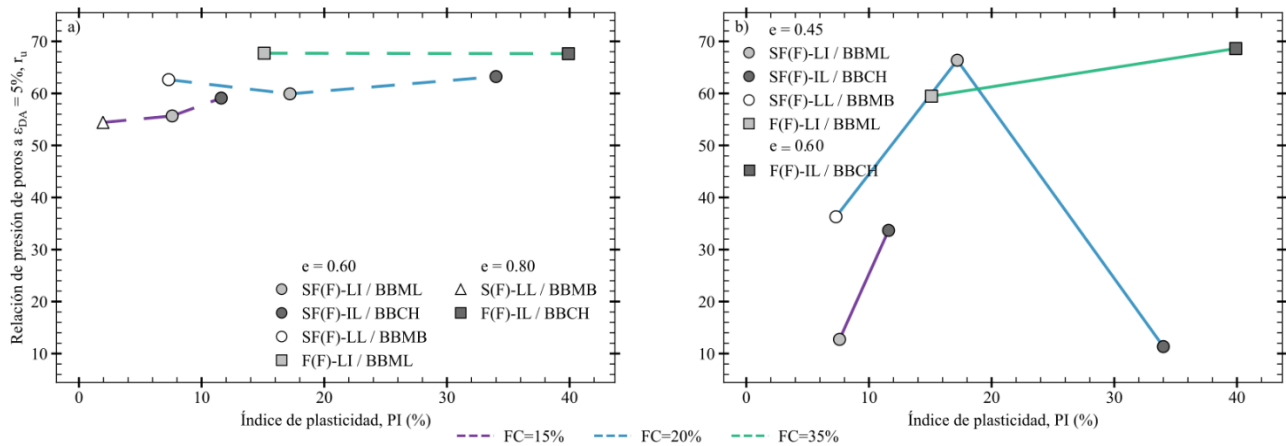


Figura 5.4. Variación de R_u en $\varepsilon_{DA} = 5\%$ en mezclas arena-finos en función de IP y del estado inicial.

En la representación en función de S_E (Véase Figura 5.5), la distribución de los resultados muestra un ordenamiento más definido dentro de cada nivel de FC , aun cuando el cambio de estado modifica la magnitud de la respuesta. Para los estados más sueltos, los valores correspondientes a los distintos contenidos de finos tienden a aproximarse y a seguir una variación lineal en función de S_E . En cambio, en los estados más densos, la serie con $FC = 20\%$ se diferencia del comportamiento observado para $FC = 15\%$ y $FC = 35\%$, desarrollando una tendencia propia. Así, aunque el estado inicial cambia el comportamiento de los resultados, la variable S_E permite captar esa variación de manera más clara, manteniendo un ordenamiento aproximadamente lineal de la respuesta dentro de cada condición de densidad.

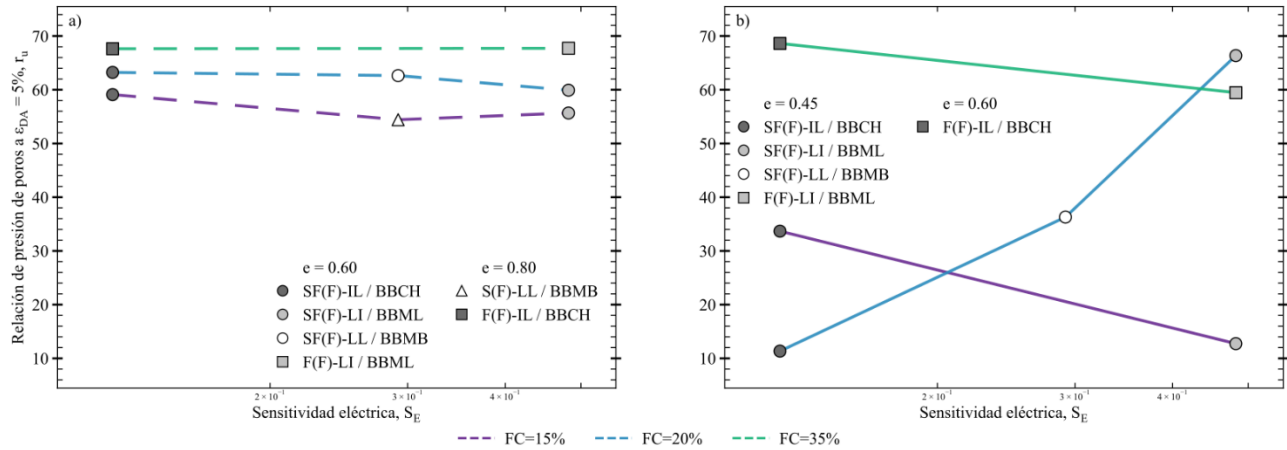


Figura 5.5. Variación de R_u en $\varepsilon_{DA} = 5\%$ en mezclas arena-finos en función de S_E y del estado inicial.

5.5. Conclusiones

Los ensayos triaxiales cíclicos realizados sobre las mezclas de arena con finos permitieron caracterizar de manera consistente la respuesta mecánica de los materiales estudiados, mostrando que esta se encuentra controlada por la interacción entre el contenido de finos, el estado inicial y la naturaleza de la fracción fina. En todos los casos, la condición de $\varepsilon_{DA} = 5\%$ fue alcanzada antes que el criterio asociado a $R_u = 1$, lo que indica que, bajo la demanda cíclica impuesta, la acumulación de deformación constituyó el umbral predominante de gatillamiento. En particular, las configuraciones ubicadas en el dominio transicional concentraron las mayores diferencias de respuesta, poniendo de manifiesto que una misma clase estructural puede contener comportamientos cíclicos marcadamente distintos.

La evaluación de la respuesta en función de IP y de la S_E mostró que ambas variables no presentan la misma capacidad para organizar el comportamiento observado. Mientras el IP no permitió establecer un ordenamiento consistente de los resultados, particularmente en la condición intermedia de finos, donde mezclas con plasticidades semejantes desarrollaron estados de presión de poros claramente distintos, la variable S_E exhibió una organización más definida de la respuesta, aun cuando el estado inicial modificó su magnitud. En los estados más sueltos, los resultados tendieron a agruparse de manera más uniforme con S_E mientras que en los estados más densos esta variable permitió distinguir con mayor claridad el comportamiento particular de las mezclas con contenido intermedio respecto de las demás configuraciones. En conjunto, los resultados obtenidos en este capítulo muestran que la

interpretación de la susceptibilidad a la licuación, en mezclas de arena con finos, requiere un enfoque integrado, en el que el estado inicial, la condición estructural y las propiedades de la fracción fina sean consideradas simultáneamente, superando descripciones basadas únicamente en parámetros plásticos tradicionales.

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El comportamiento mecánico de las mezclas no depende exclusivamente del contenido de finos ni de los parámetros tradicionales de plasticidad. Los resultados muestran que la respuesta observada está controlada por la interacción entre el estado inicial, la naturaleza de la fracción fina y la condición estructural de la mezcla. El estudio confirma que los suelos transicionales no pueden ser descritos adecuadamente mediante umbrales fijos o clasificaciones únicas derivadas del SUCS, y que la incorporación de variables con mayor fundamento físico, como las consideradas por el SRCS, proporciona una base más consistente para interpretar su susceptibilidad a la licuación. En particular, una mezcla clasificada dentro de la zona de licuación, por el criterio de susceptibilidad más recientemente propuesto en la literatura, desarrolló experimentalmente una respuesta asociada a ablandamiento cíclico, la cual fue interpretada de manera más consistente por el SRCS al ubicarla en un dominio transicional. Así, esta categorización mostró una mejor capacidad para representar comportamientos intermedios que no son adecuadamente capturados por clasificaciones actuales.

6.1. Influencia de las variables de clasificación de la fracción fina

La evaluación de la respuesta en función del IP y de la S_E , mostró que ambas variables no presentan la misma capacidad para organizar el comportamiento observado. El parámetro de plasticidad no permitió establecer un ordenamiento consistente de los resultados, particularmente en las mezclas con contenido intermedio de finos, donde materiales con valores similares desarrollaron estados de presión de poros claramente distintos. Los parámetros plásticos tradicionales resultan insuficientes para describir, con claridad, la respuesta cíclica de mezclas ubicadas en el dominio transicional. La S_E se presenta como una variable con mayor capacidad para organizar la respuesta observada que los parámetros plásticos convencionales, particularmente en mezclas transicionales.

6.2. Influencia de la zona transicional y del umbral de finos sobre la respuesta cíclica de las mezclas

Los resultados obtenidos muestran que la zona transicional concentra la mayor variabilidad de respuesta entre las mezclas estudiadas, lo que confirma su relevancia en la evaluación de la susceptibilidad a la licuación. En este dominio, materiales agrupados dentro de una misma clase

general pueden desarrollar comportamientos cíclicos marcadamente distintos, tanto en términos de acumulación de deformación como de generación de presión de poros. Asimismo, los resultados indican que la influencia de los finos sobre la respuesta de la mezcla comienza a manifestarse para contenidos inferiores al 20%. En este sentido, la clasificación SRCS resulta especialmente pertinente, ya que permite definir de manera más consistente el momento en que el contenido de finos, junto con sus características de plasticidad, mineralogía e interacción con el fluido de poros, comienza a modificar la matriz resistente del material. Por ello, se recomienda emplear esta clasificación para identificar con mayor fundamento físico el inicio de la influencia de los finos y la evolución hacia comportamientos transicionales, dejando de lado así criterios basados únicamente en porcentajes fijos de fracción fina.

6.3. Limitaciones del estudio

Si bien los resultados obtenidos aportan antecedentes relevantes, el presente estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al momento de interpretar su alcance y de proyectar sus implicancias.

- Método de reconstitución de las probetas: La respuesta cíclica de las mezclas puede verse influida por el método de preparación, ya que este condiciona la estructura interna, la distribución de vacíos y la homogeneidad de la muestra. Dado que en este estudio se utilizó un único procedimiento de reconstitución, los resultados deben interpretarse dentro de ese marco experimental.
- Morfología de la fracción gruesa: El estudio consideró una sola arena base, con una condición particular de redondez y características granulométricas específicas. Por ello, las tendencias observadas se encuentran acotadas a esta configuración y no necesariamente representan el comportamiento de mezclas elaboradas con arenas de distinta morfología.
- Nivel de demanda cíclica aplicado. Los ensayos fueron realizados bajo una única razón de esfuerzo cíclico, por lo que no fue posible evaluar la sensibilidad de la respuesta frente a distintos niveles de sollicitación. En consecuencia, los resultados obtenidos corresponden a las condiciones de carga adoptadas en esta investigación.

6.4. Líneas futuras de trabajo

Con el fin de ampliar el alcance de los resultados obtenidos y dar continuidad a las observaciones desarrolladas en esta investigación, se plantean las siguientes recomendaciones para trabajos futuros:

- Incorporar nuevos niveles de demanda cíclica, con el propósito de evaluar la estabilidad de las tendencias observadas y avanzar hacia la formulación de un modelo de resistencia cíclica para mezclas arena–finos, en función de su condición estructural y de las propiedades de la fracción fina.
- Integrar métricas para analizar la histéresis de la respuesta cíclica de los ensayos, con el fin de complementar la interpretación basada en deformación y presión de poros. Ello permitiría caracterizar con mayor detalle la degradación de rigidez, la disipación de energía y las diferencias de comportamiento entre mezclas.
- Ampliar el rango de valores de S_E considerados en el análisis. Ello permitiría examinar con mayor resolución la sensibilidad de la respuesta cíclica frente a variaciones de este parámetro y fortalecer la evaluación de su utilidad, junto con la clasificación SRCS, para la interpretación del comportamiento de mezclas transicionales.
- Examinar la influencia de un nuevo método de reconstitución, como el método *slurry deposition*, sobre la respuesta cíclica de las mezclas. Esto permitiría evaluar en qué medida la estructura inicial inducida por la técnica de reconstitución modifica la generación de presión de poros, la acumulación de deformaciones y el tipo de comportamiento desarrollado bajo carga cíclica.

REFERENCIAS

- Armstrong, R. J., & Malvick, E. J. (2016). Practical considerations in the use of liquefaction susceptibility criteria. *Earthquake Spectra*, 32(3), 1941–1950. <https://doi.org/10.1193/071114EQS100R>
- ASTM D2487-17. (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.
- ASTM International. (2017a). *ASTM D4318-17e1: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. <https://www.astm.org/d4318-17e01.html>
- ASTM International. (2017b). *ASTM D6913/D6913M-17, Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. ASTM International.
- ASTM International. (2025). *ASTM D5311/D5311M-25, Standard Test Method for Load Controlled Cyclic Triaxial Response of Soil*. ASTM International.
- Atterberg, A. (1905). Die rationelle Klassifikation der Sande und Kiese. *Chemiker-Zeitung*, 15.
- Boulanger, R. W., Asce, M., & Idriss, I. M. (2006). *Liquefaction Susceptibility Criteria for Silts and Clays*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:111413>
- Bray, J. D., & Sancio, R. B. (2006). *Assessment of the Liquefaction Susceptibility of Fine-Grained Soils*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:91165>
- Casagrande, A. (1948a). Classification and identification of soils. *ASCE Transactions*, 113, 901–991.
- Casagrande, A. (1948b). Classification and identification of soils. *ASCE Transactions*, 113, 901–991.
- Casagrande, A. (1975). Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands: A Critical Review. *Proceedings of the Fifth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 5, 79–133.
- Castro, G. M., Park, J., & Santamarina, J. C. (2023). Revised Soil Classification System: Implementation and Engineering Implications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(11). <https://doi.org/10.1061/jggefek.gteng-10447>
- Cho, G.-C., Dodds, J., & Santamarina, J. C. (n.d.). *Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:5591>
- Chong, S.-H., & Santamarina, J. C. (2016). Soil Compressibility Models for a Wide Stress Range. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12), 6016003. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001482](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001482)

- Cuitiño Gajardo, M. B. (2016). *Aplicación del modelo constitutivo hipoplástico y de acumulación para la estimación de asentamientos en suelos arenosos del Bío Bío sometidos a carga monotónica, cíclica y de aceleración*. Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Dobry, R., & Poblete, M. (1966). Densidades máximas y mínimas de las arenas del Bío-Bío. *Revista IDIEM*, 5(3), 151–159.
- Escribano Leiva, D., Kuncar Medina, C., & Montalva, G. (2025). Using a smartphone device to quantify particle size and shape descriptors. *Acta Geotechnica*, 20(10), 5277–5295. <https://doi.org/10.1007/s11440-025-02676-x>
- Ghadr, S., Samadzadeh, A., Bahadori, H., O’Kelly, B. C., & Assadi-Langroudi, A. (2021). Liquefaction Resistance of Silty Sand with Ground Rubber Additive. *International Journal of Geomechanics*, 21(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0002002](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002002)
- Glossop, R., & Skempton, A. W. (1945). Particle-size in silts and sands. *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 25(2), 81–105. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1945.13927>
- Gobins, J. (2014). Unification of Soil Classification in the 21st Century. *Geo-Congress 2014: Geo-Characterization and Modeling for Sustainability*, 2082–2087.
- Goldbeck, A. T., & Jackson, F. R. (1921). Tests for Subgrade Soils. *Public Roads*, 4(3), 15–21.
- Guggenheim, S., & Martin, R. T. (1995). Definition of clay and clay mineral: joint report of the AIPEA nomenclature and CMS nomenclature committees. *Clays and Clay Minerals*, 43(2), 255–256. <https://doi.org/10.1346/CCMN.1995.0430213>
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An Introduction to Geotechnical Engineering*. Prentice Hall.
- Ishihara, K. (1993). Liquefaction and Flow Failure during Earthquakes. *Géotechnique*, 43(3), 351–415. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.3.351>
- Jang, J., & Carlos Santamarina, J. (2016). Fines Classification Based on Sensitivity to Pore-Fluid Chemistry. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(4). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001420](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001420)
- Japanese Geotechnical Society. (2009). *JGS 0161-2009, Test method for minimum and maximum densities of sands (JIS A 1224)*. Japanese Geotechnical Society.
- Kaothon, P., Lee, S. H., Choi, Y. T., & Yune, C. Y. (2022). The Effect of Fines Content on Compressional Behavior When Using Sand–Kaolinite Mixtures as Embankment Materials. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/app12126050>
- Kayabali, K. (n.d.). *Determination of Consistency Limits: A Comparison between-#40 and-#200 Materials*. Retrieved <https://www.researchgate.net/publication/268437310>

- Krumbein, W. C., & Sloss, L. L. (1963). *Stratigraphy and Sedimentation* (2nd ed.). W. H. Freeman and Company.
- Ladd, R. S. (1974). Specimen Preparation and Liquefaction of Sands. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 100(GT10), 1180–1184. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000117>
- Ladd, R. S. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16–23. <https://doi.org/10.1520/GTJ10364J>
- Locat, J., & Demers, D. (1988). Viscosity, yield stress, remolded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 25(4), 799–806. <https://doi.org/10.1139/t88-088>
- Montalva, G. A., Ruz, F., Roncagliolo, J., & Escare, E. (2017). *LIQUEFACTION TRIGGERING ANALYSIS IN MEGATHRUST EARTHQUAKES*.
- Montalva, G., Ruz, F., Escribano, D., Bastías, N., Espinoza, D., & Paredes, F. (2022). Chilean liquefaction case history database. *Earthquake Spectra*, 38(3), 2260–2280. <https://doi.org/10.1177/87552930211070313>
- Moreno-Maroto, J. M., Alonso-Azcárate, J., & O’Kelly, B. C. (2021). Review and critical examination of fine-grained soil classification systems based on plasticity. In *Applied Clay Science* (Vol. 200). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2020.105955>
- Mulilis, J. P., Seed, H. B., Chan, C. K., Mitchell, J. K., & Arulanandan, K. (1977). Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(2), 91–108. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000387>
- Palomino, A. M., & Santamarina, J. C. (2005). Fabric Map for Kaolinite: Effects of pH and Ionic Concentration on Behavior. *Clays and Clay Minerals*, 53(3), 211–223. <https://doi.org/10.1346/CCMN.2005.0530302>
- Park, J., & Santamarina, J. C. (2017). Revised Soil Classification System for Coarse-Fine Mixtures. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(8). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001705](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001705)
- Pennekamp, Joh. G. S., Talmon, A. M., & van Kesteren, W. G. M. (2010). Determination of Non-Segregating Tailings Conditions. *Proceedings of the 19th World Dredging Congress (WODCON XIX)*, 848–858.
- Robertson, P. K., & Fear, C. E. (1995). Liquefaction of Sands and Its Evaluation. In K. Ishihara (Ed.), *IS-Tokyo '95: The First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering* (pp. 1253–1289). A. A. Balkema.

- Saldaña-Sotelo, H., Montalva, G., Escribano, D., Núñez-Jara, S., & Tiznado, J. C. (2024). Two-dimensional nonlinear dynamic analysis of a liquefaction case history considering spatial variability and long-duration megathrust earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.108511>
- Santamarina, J., Tech, G., Cho, U. G., & Korea, S. (n.d.). *Soil behaviour: The role of particle shape*.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1982). *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Seed, H. B., & Lee, K. L. (1966). Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 92(SM6), 105–134.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., & Faris, A. (n.d.-a). *RECENT ADVANCES IN SOIL LIQUEFACTION ENGINEERING: A UNIFIED AND CONSISTENT FRAMEWORK*.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E. S., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., Riemer, M. F., Sancio, R. B., Bray, J. D., Kayen, R. E., & Faris, A. (n.d.-b). *RECENT ADVANCES IN SOIL LIQUEFACTION ENGINEERING: A UNIFIED AND CONSISTENT FRAMEWORK*.
- Skempton, A. W. (1953). The colloidal activity of clays. *Proceedings of the 3rd International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1, 57–61.
- Stuedlein, A. W., Dadashiserej, A., Jana, A., & Evans, T. M. (2023). Liquefaction Susceptibility and Cyclic Response of Intact Nonplastic and Plastic Silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 149(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002935](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002935)
- Tatsuoka, F., Toki, S., Miura, S., Kato, H., Okamoto, M., Yamada, S., Yasuda, S., & Tanizawa, F. (1986). Some Factors Affecting Cyclic Undrained Triaxial Strength of Sand. *Soils and Foundations*, 26(3), 99–116. https://doi.org/10.3208/sandf1972.26.3_99
- Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. Franz Deuticke.
- Thevanayagam, S., Shenthana, T., Mohan, S., & Liang, J. (n.d.). *Undrained Fragility of Clean Sands, Silty Sands, and Sandy Silts*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412002128:10849>
- Wang, W. S. (1979). *Some Findings in Soil Liquefaction*.
- Youd, T. L. (1973). Factors Controlling Maximum and Minimum Densities of Sands. In E. T. Selig & R. S. Ladd (Eds.), *Evaluation of Relative Density and Its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils* (Vol. 523, pp. 98–112). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/STP37866S>

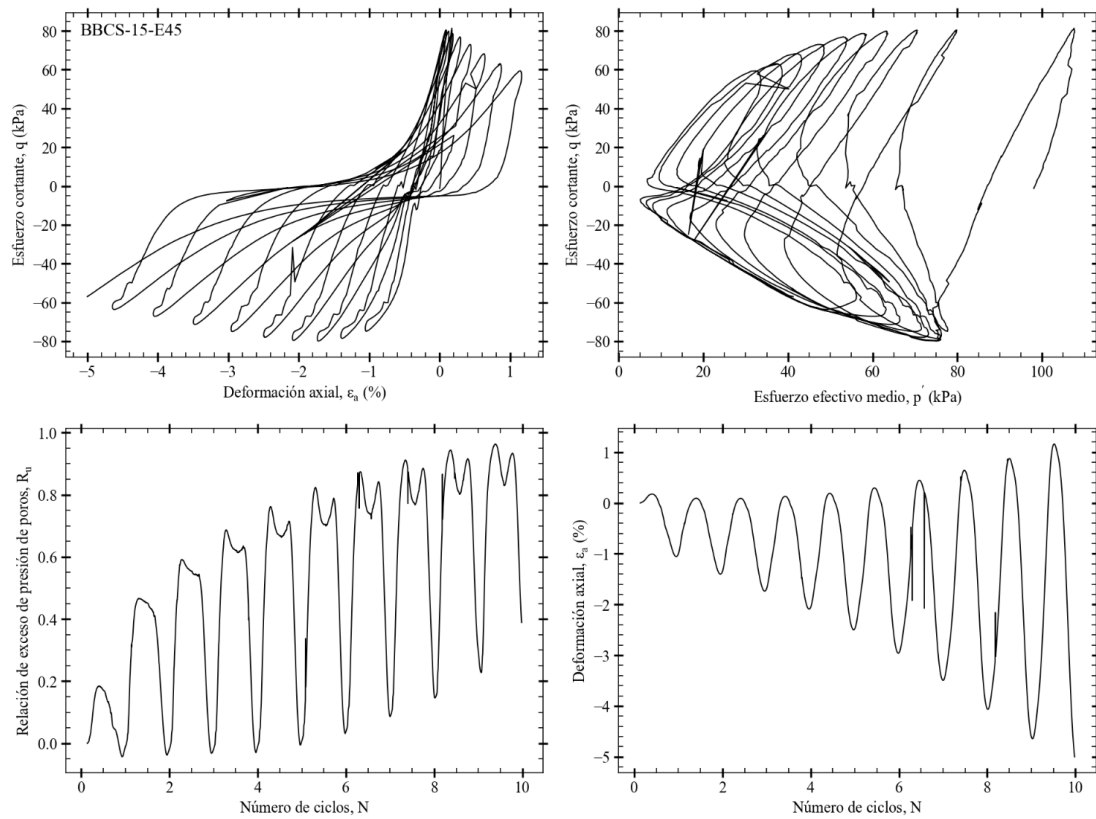
Zheng, J., & Hryciw, R. D. (2015). Traditional Soil Particle Sphericity, Roundness and Surface Roughness by Computational Geometry. *Géotechnique*, 65(6), 494–506.
<https://doi.org/10.1680/geot.14.P.192>

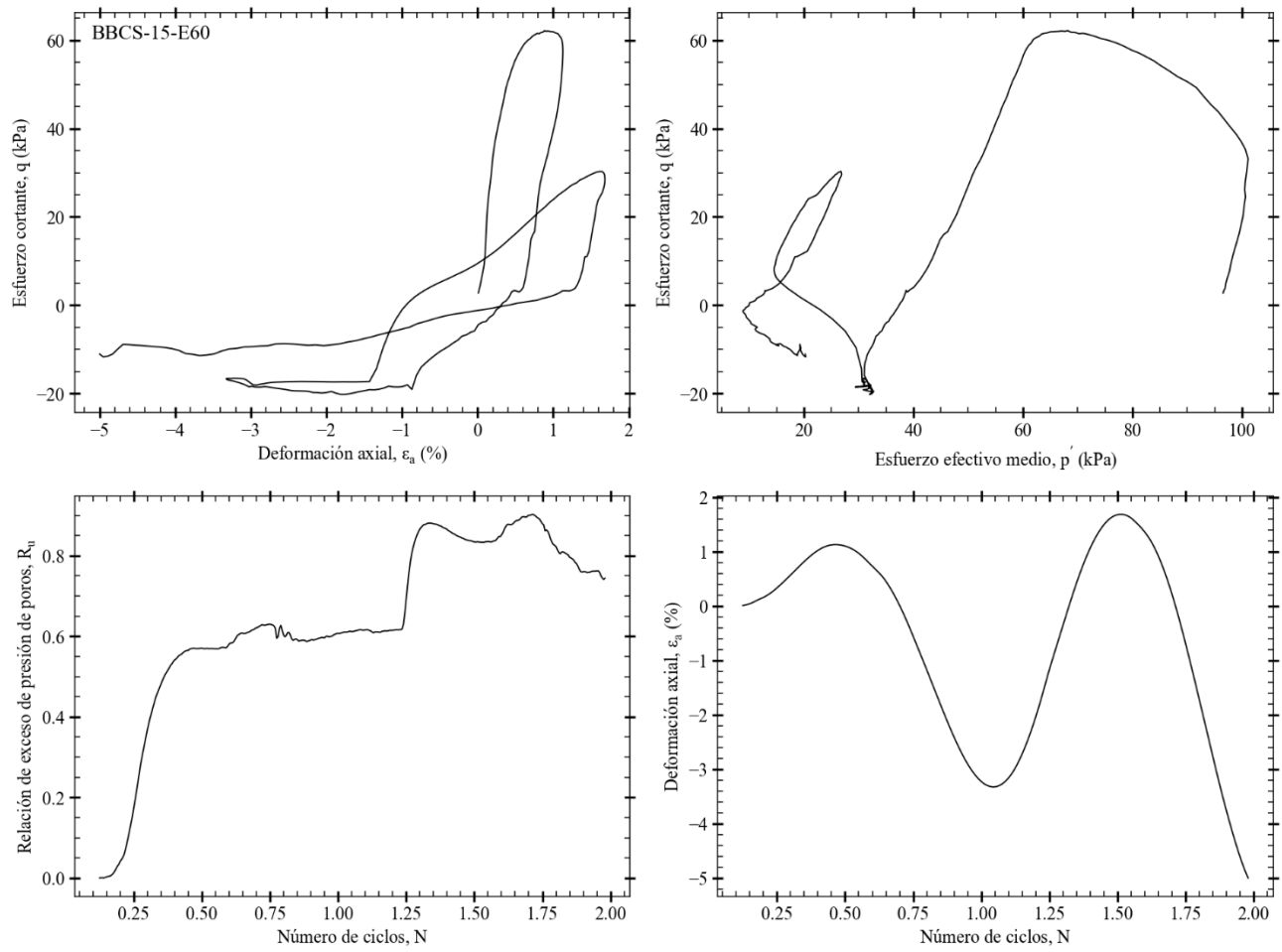
ANEXO 1. CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☒ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☐ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☐ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☐ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☐ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
La presente memoria se vincula con el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura, en tanto contribuye a una mejor comprensión de un fenómeno que, en el contexto de la geotecnia sísmica, constituye una limitación relevante para el diseño y desempeño de obras de infraestructura. En particular, el estudio de la susceptibilidad a la licuación en mezclas de arena con finos aporta antecedentes que favorecen una evaluación más consistente del comportamiento del terreno frente a sollicitaciones sísmicas, aspecto fundamental para la planificación, el diseño y la seguridad de obras civiles.

ANEXO 5.1. RESPUESTA CÍCLICA DE LAS MEZCLAS**Figura A.5.1.1. Respuesta cíclica del espécimen BBCS-15-E45.**

**Figura A.5.1.1. Respuesta cíclica del espécimen BBCS-15-E60.**

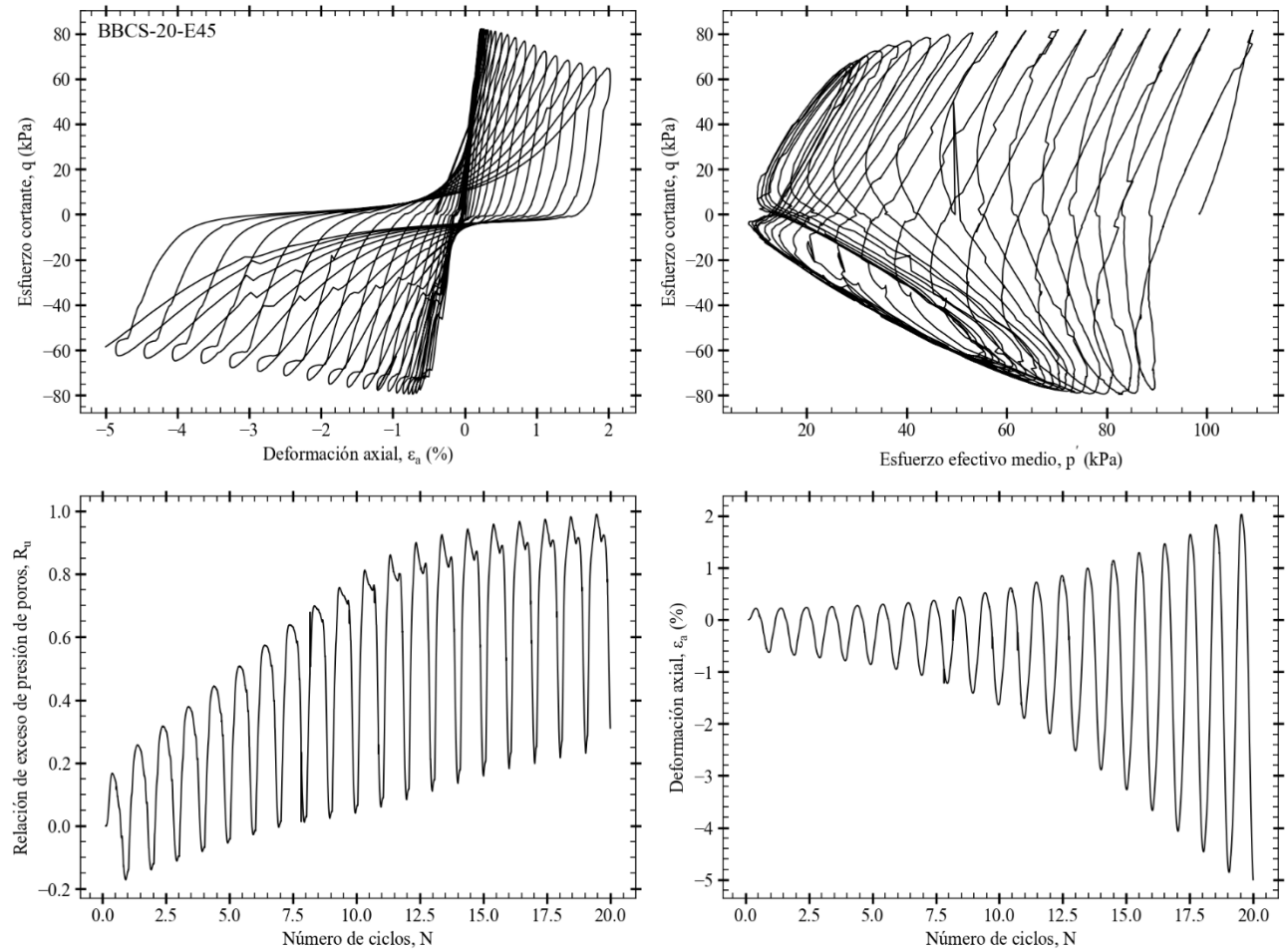
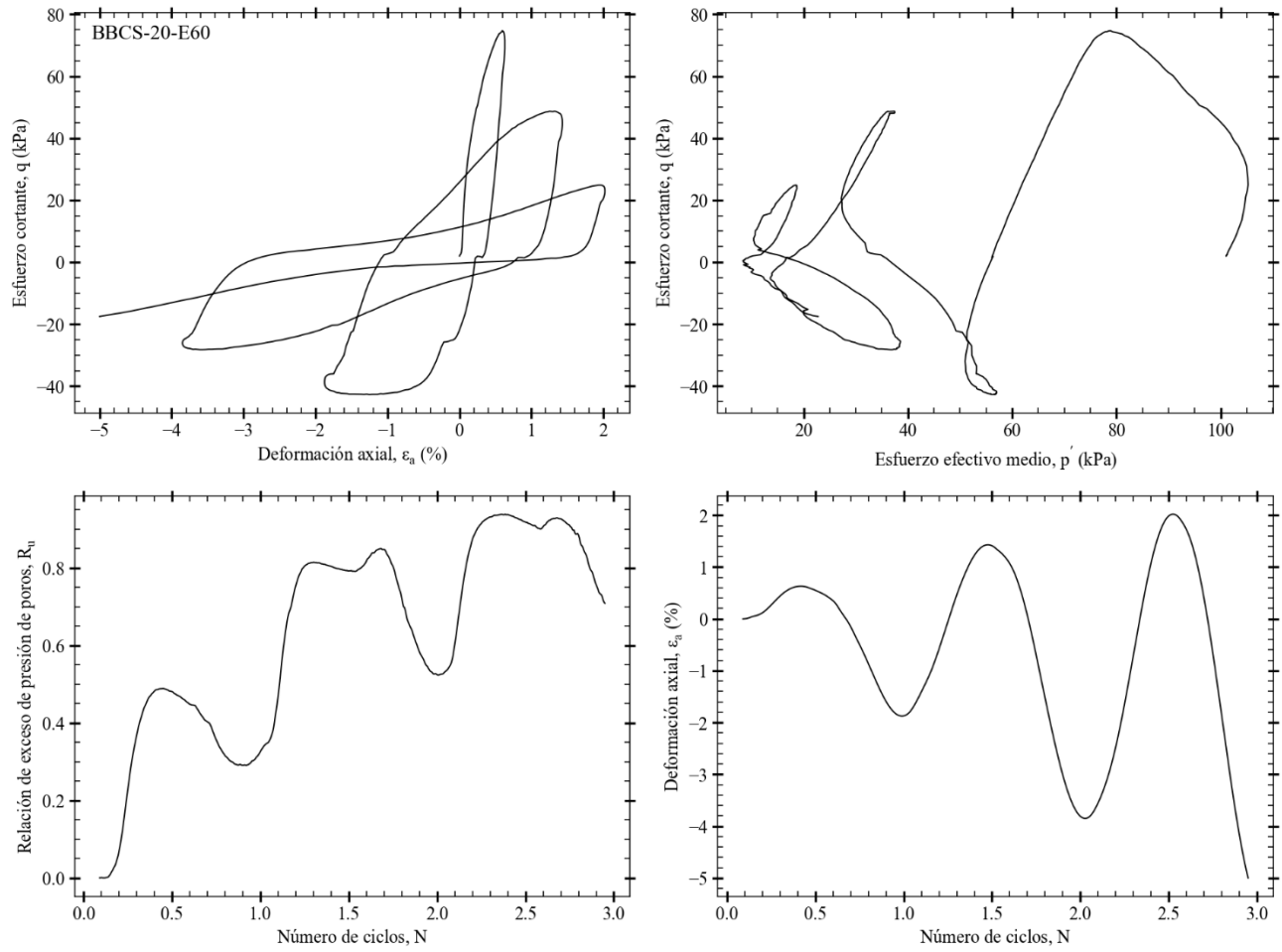
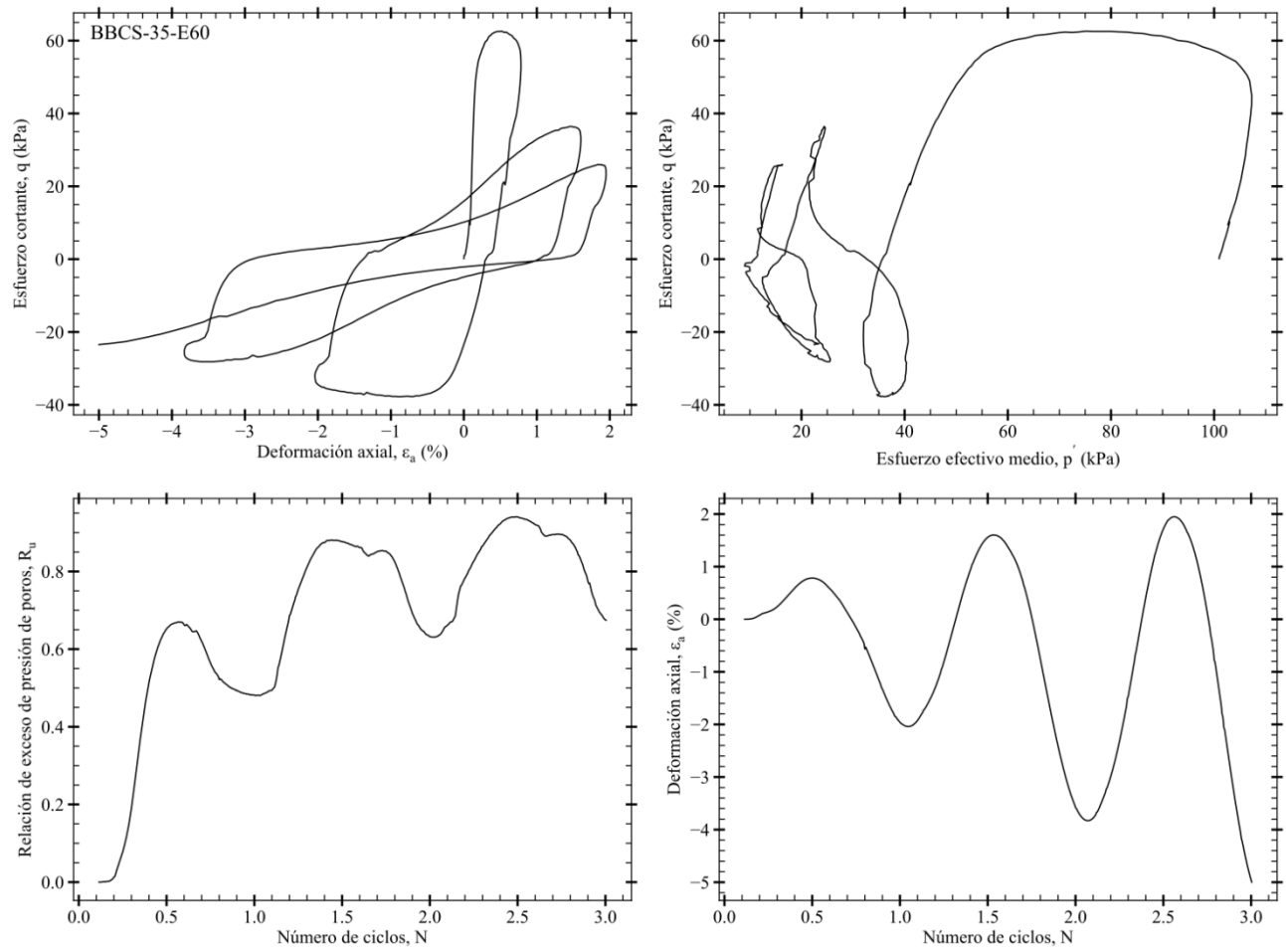


Figura A.5.1.2. Respuesta cíclica del espécimen BBCS-20-E45.

**Figura A.5.1.3. Respuesta cíclica del espécimen BBCS-20-E60.**

**Figura A.5.1.4. Respuesta cíclica del espécimen BBCS-35-E60.**

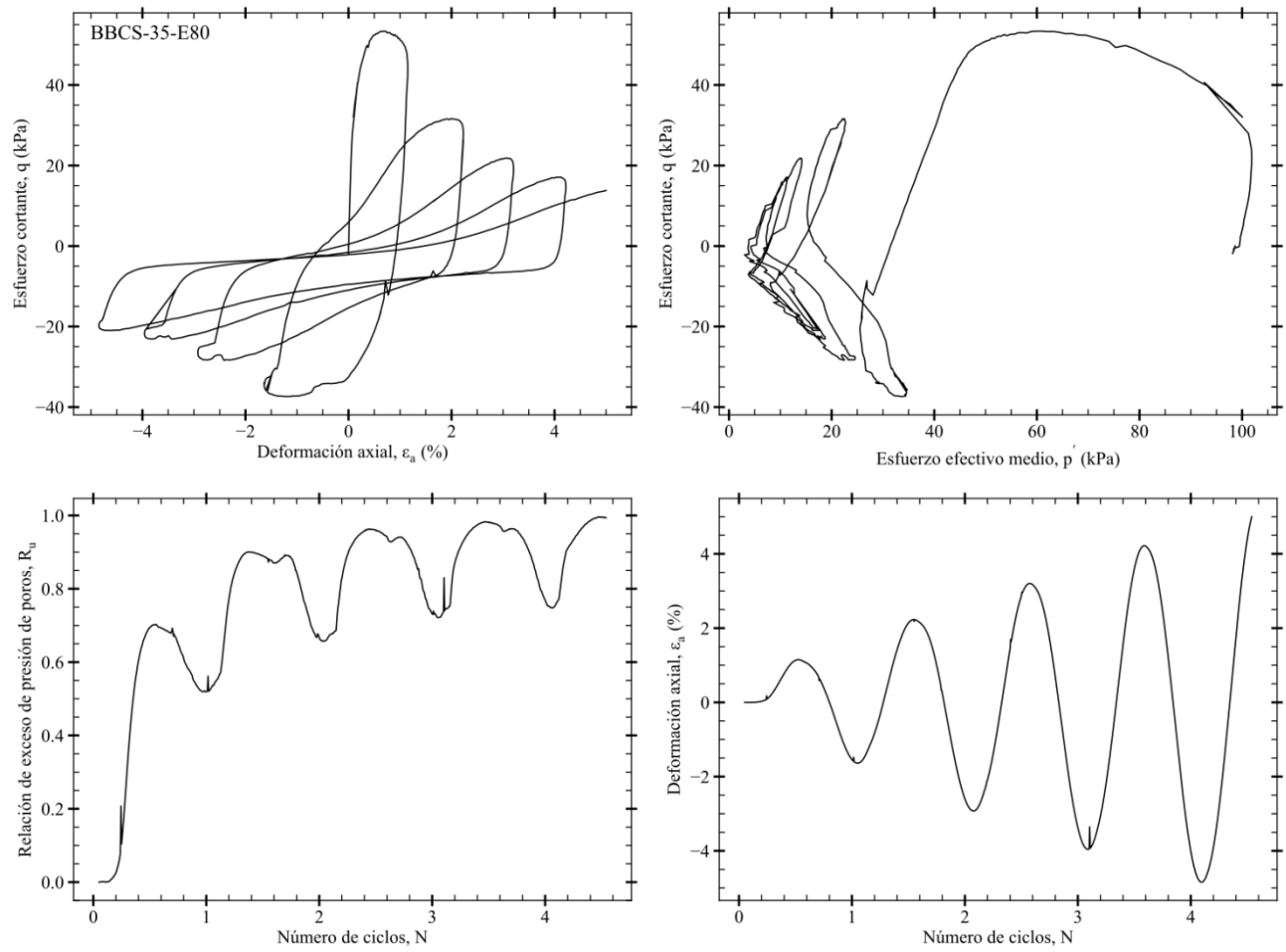


Figura A.5.1.5. Respuesta cíclica del espécimen BBCS-35-E80.

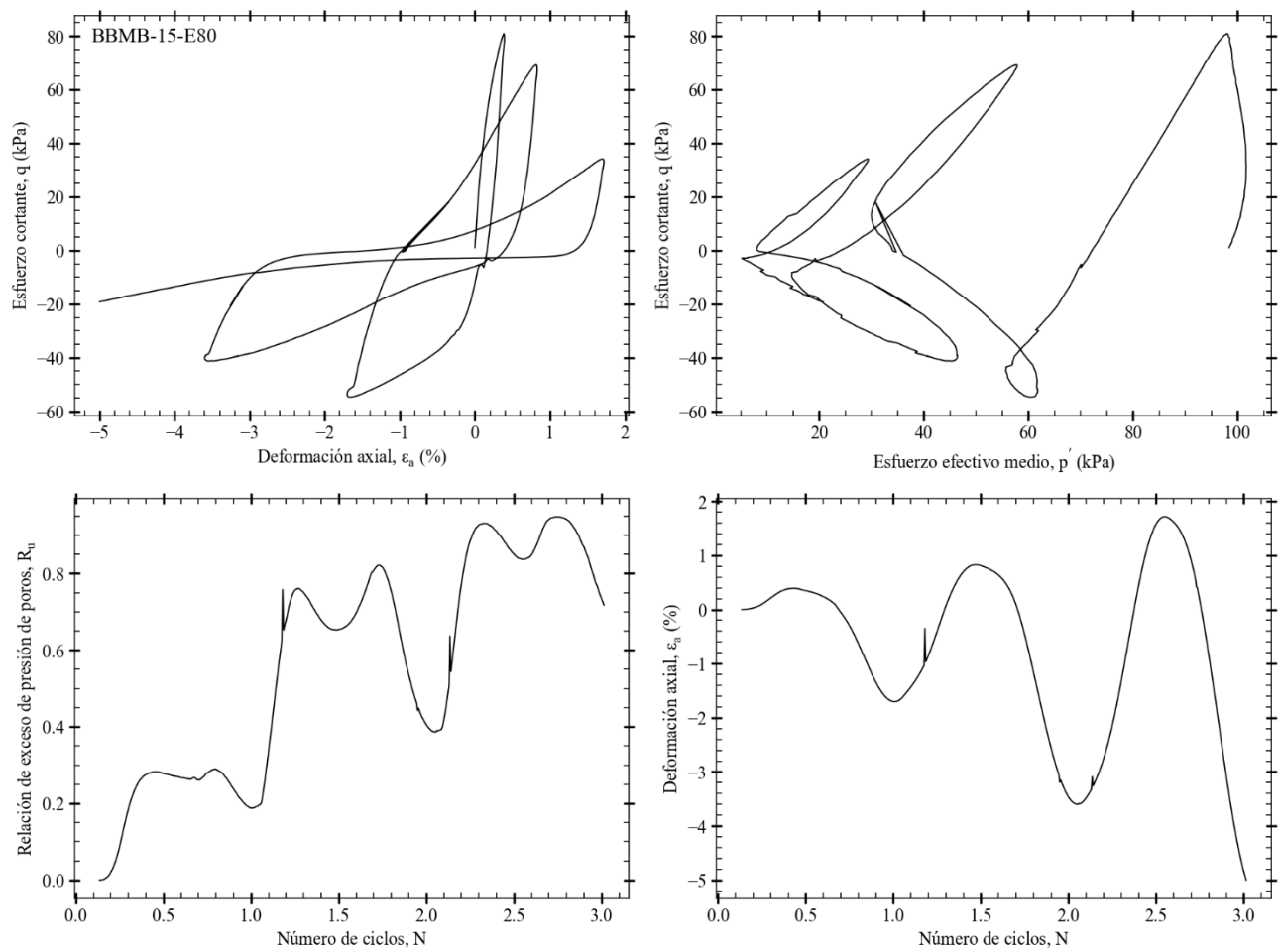


Figura A.5.1.6. Respuesta cíclica del espécimen BBMB-15-E80.

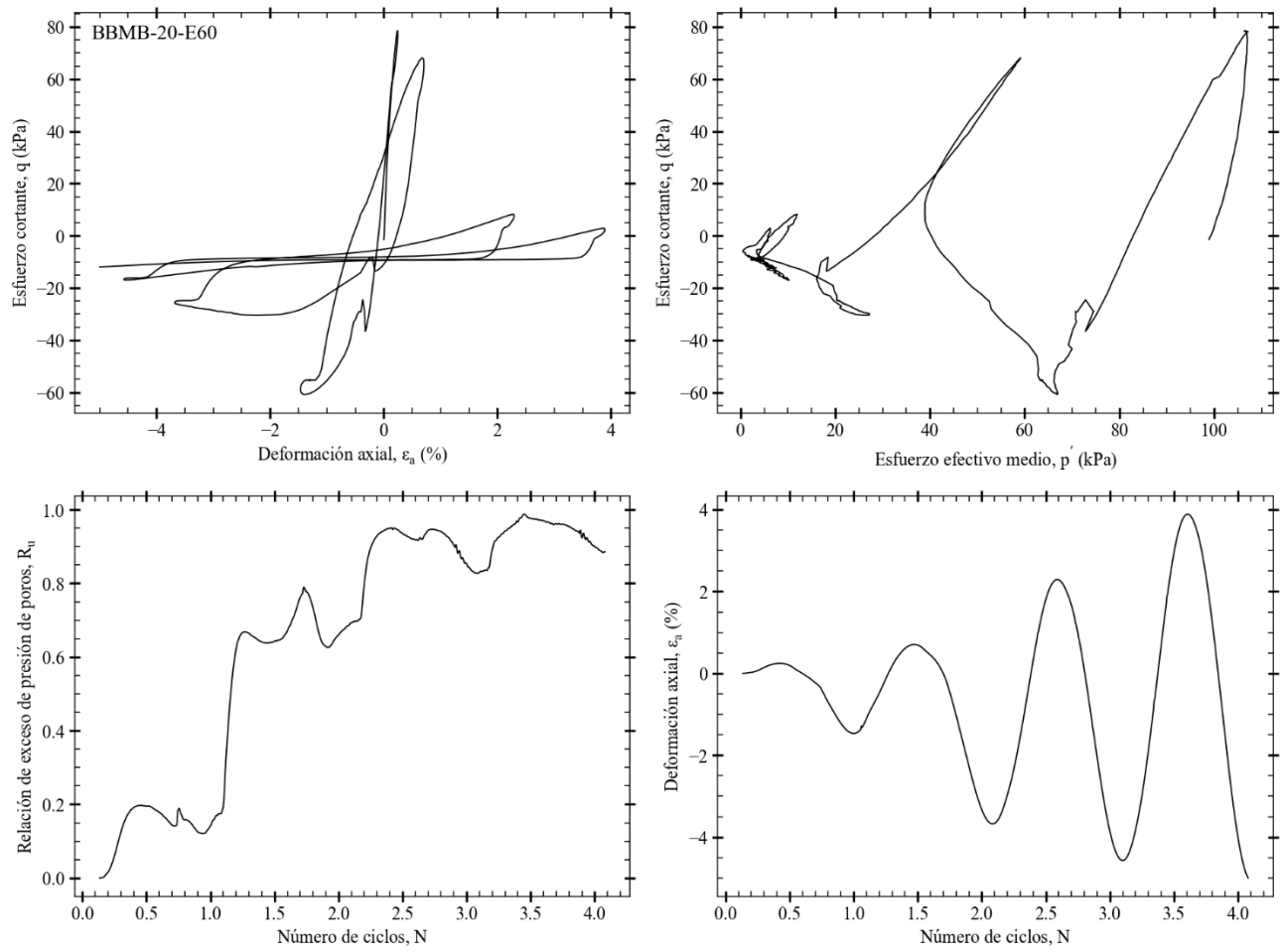


Figura A.5.1.7. Respuesta cíclica del espécimen BBMB-20-E60.

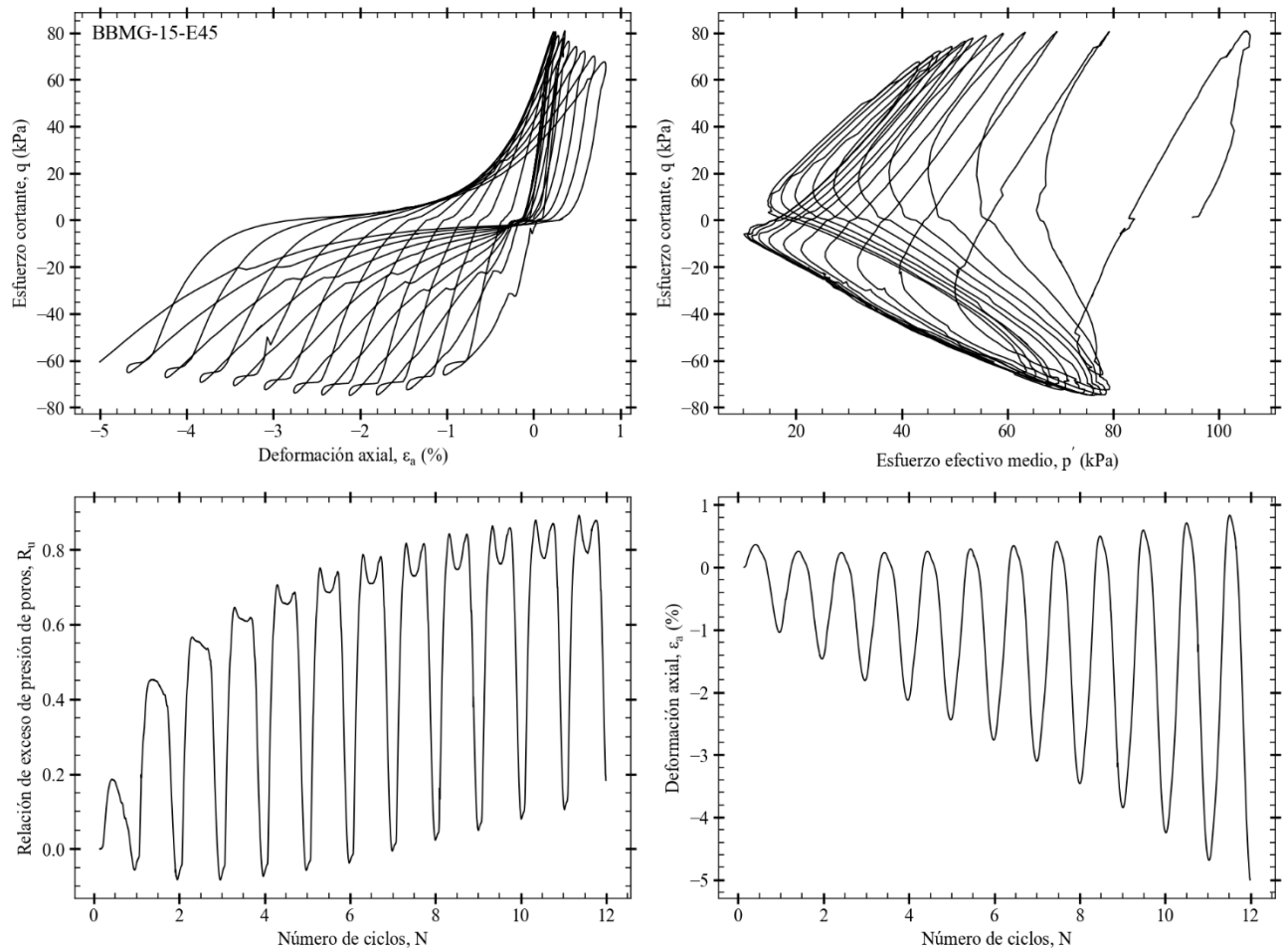


Figura A.5.1.8. Respuesta cíclica del espécimen BBMG-15-E45.

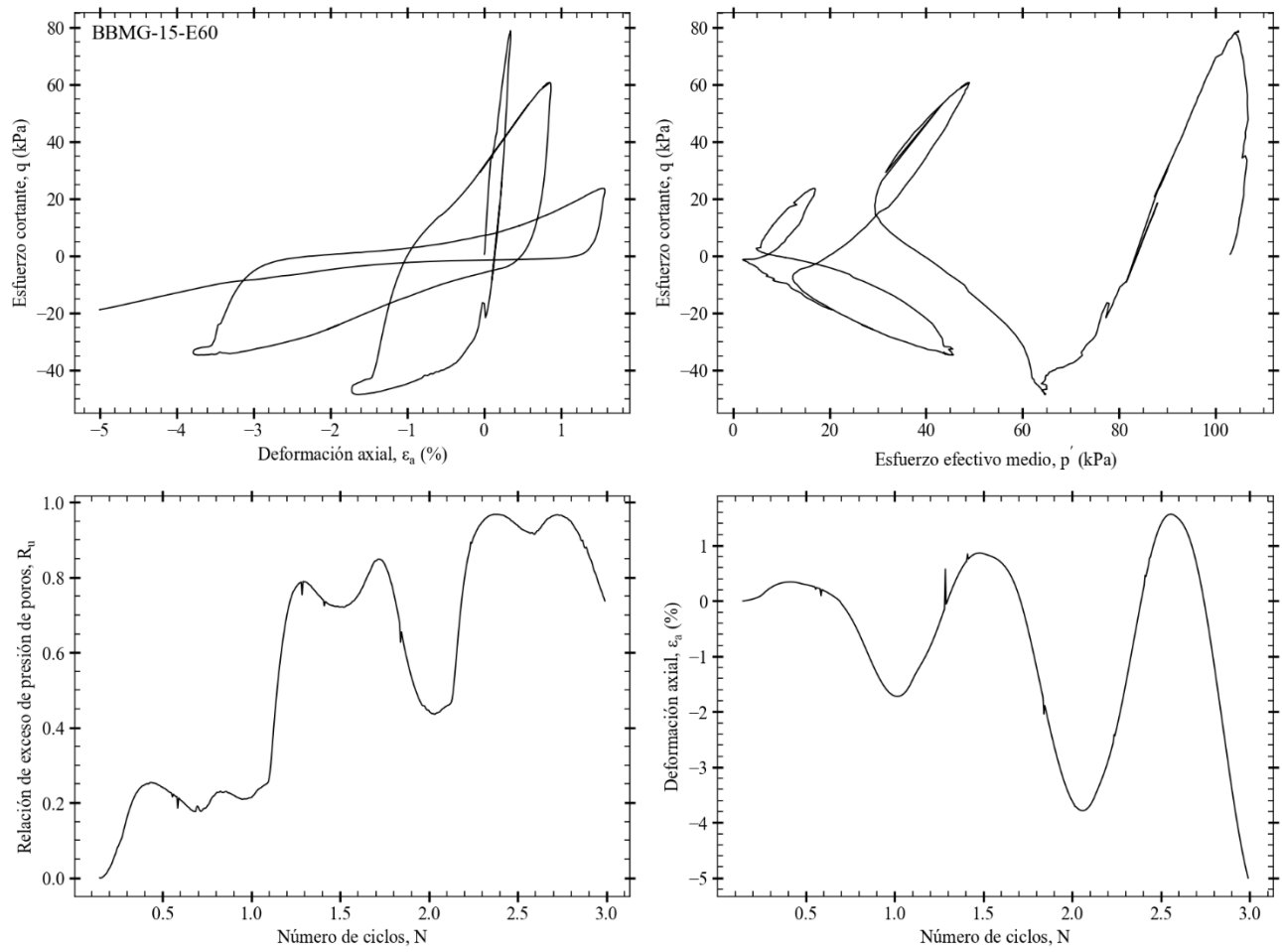


Figura A.5.1.9. Respuesta cíclica del espécimen BBMG-15-E60.

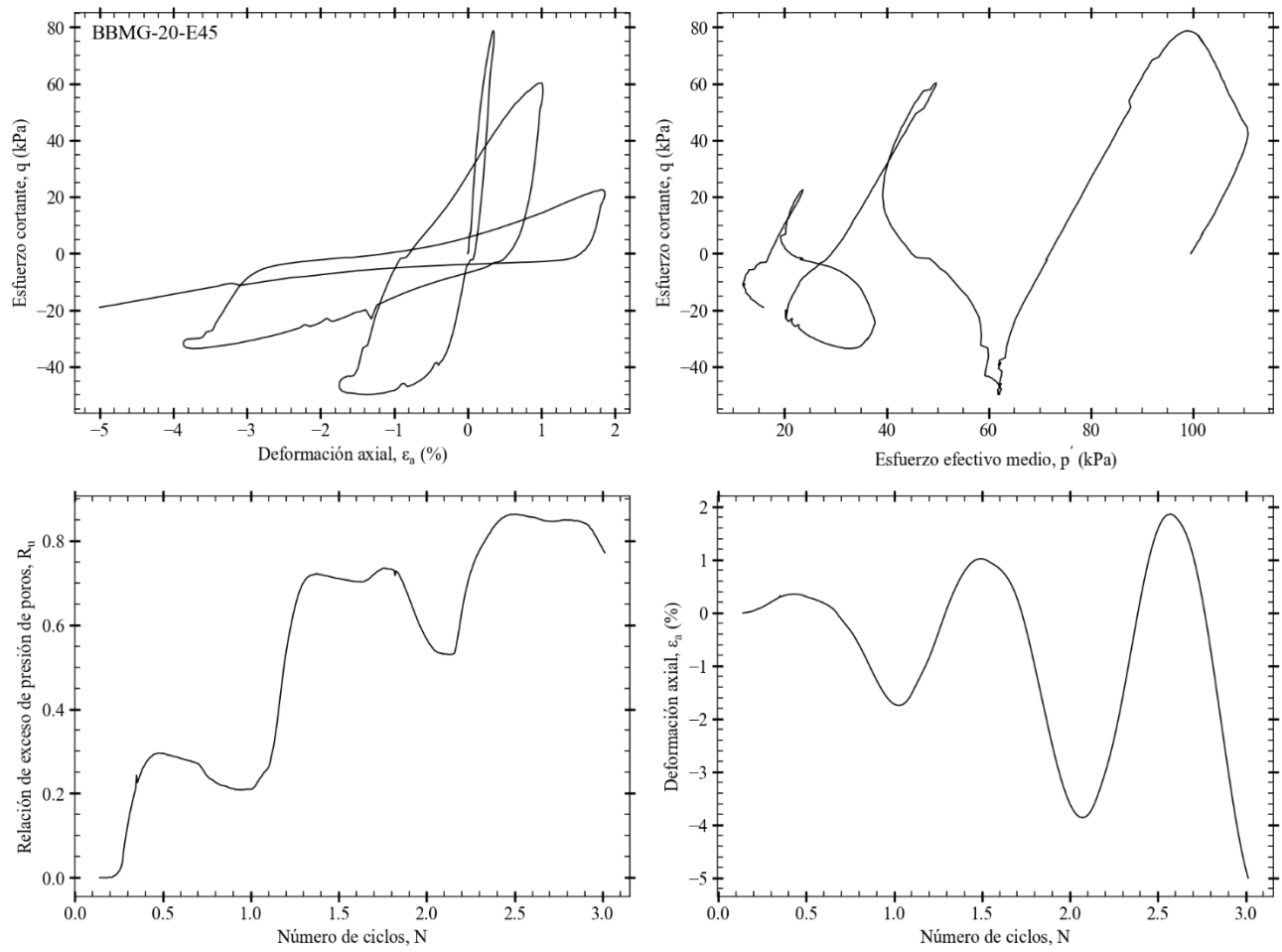


Figura A.5.1.10. Respuesta cíclica del espécimen BBMG-20-E45.

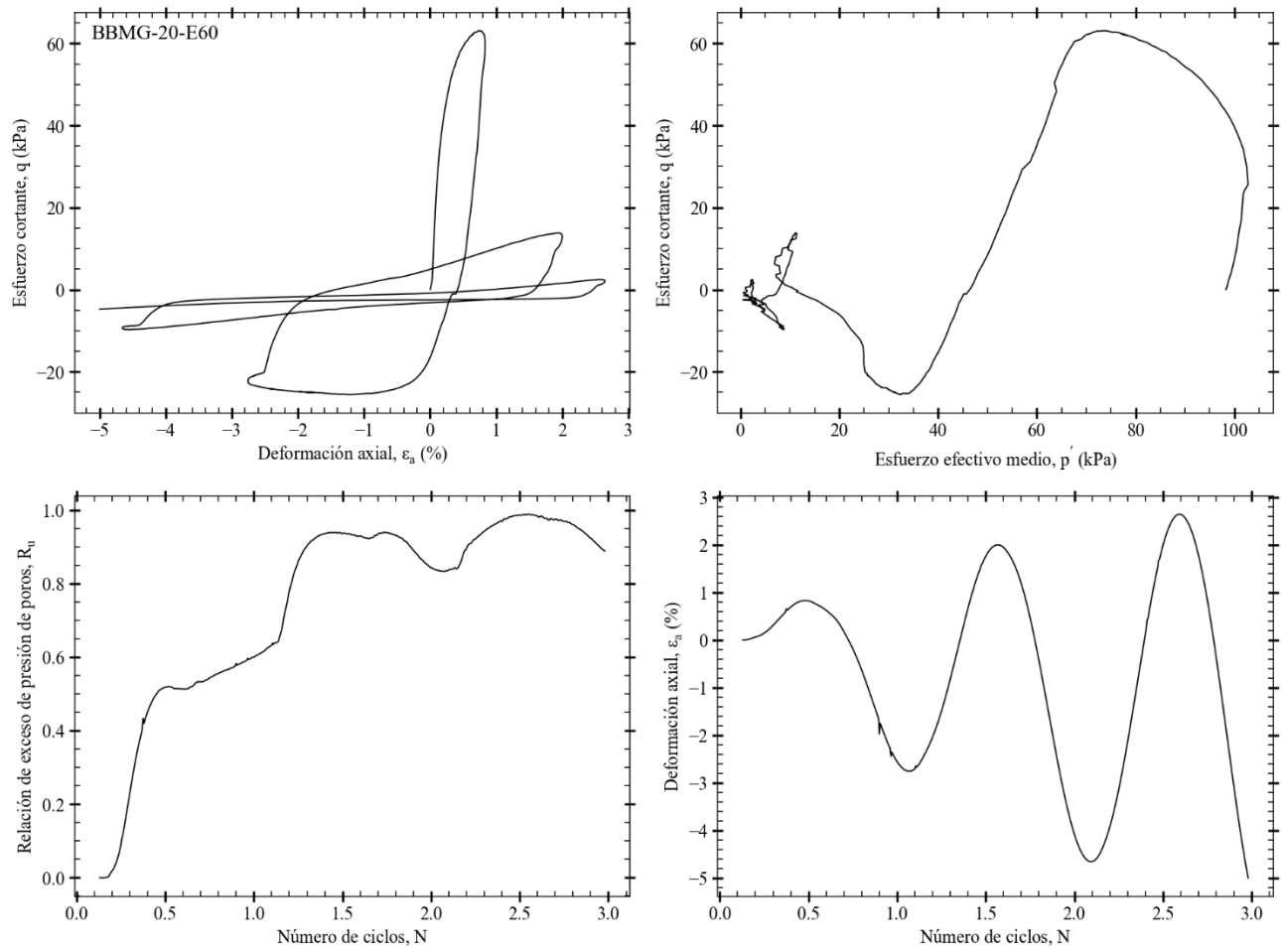


Figura A.5.1.11. Respuesta cíclica del espécimen BBMG-20-E60.

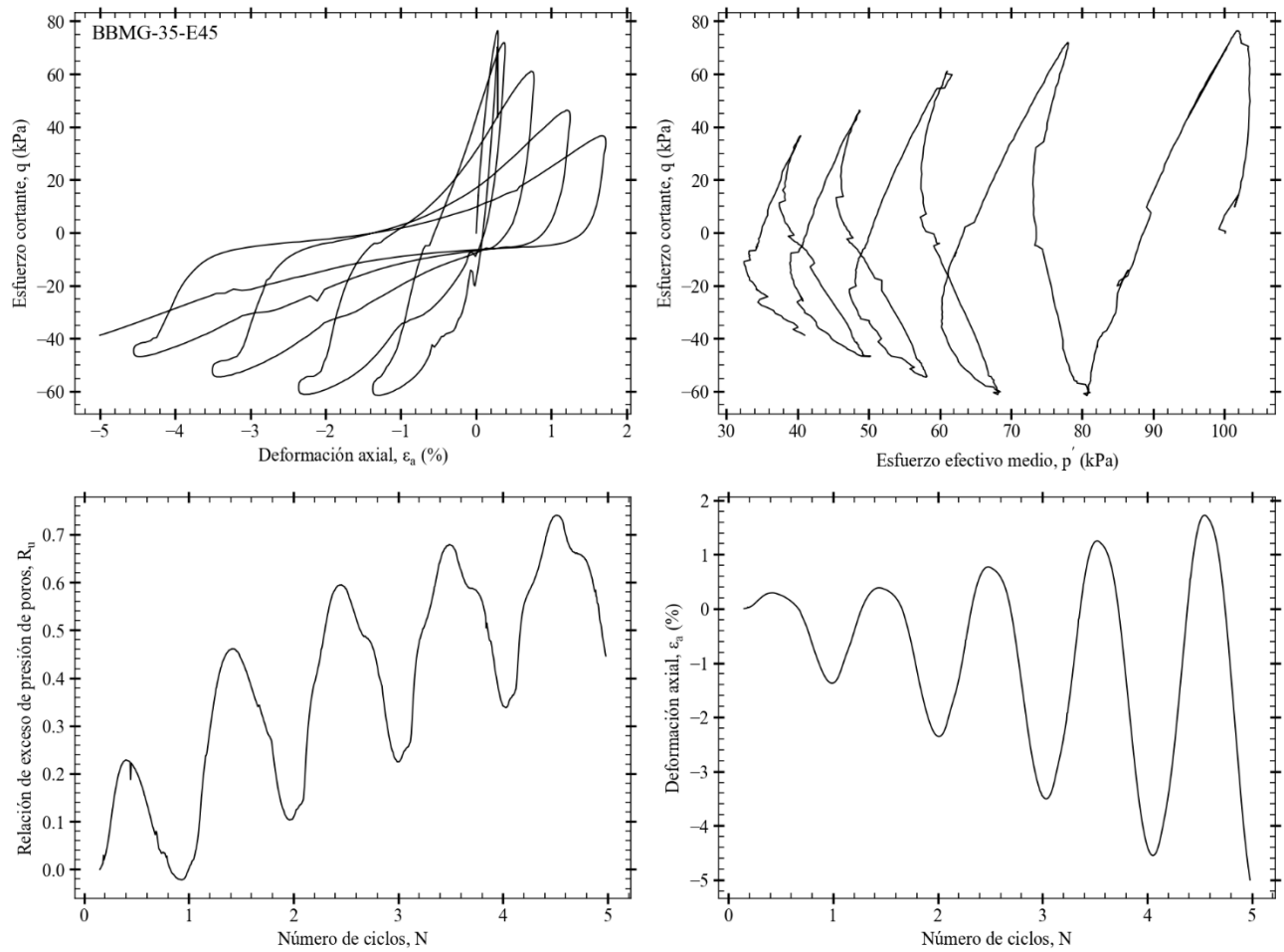


Figura A.5.1.12. Respuesta cíclica del espécimen BBMG-35-E45.

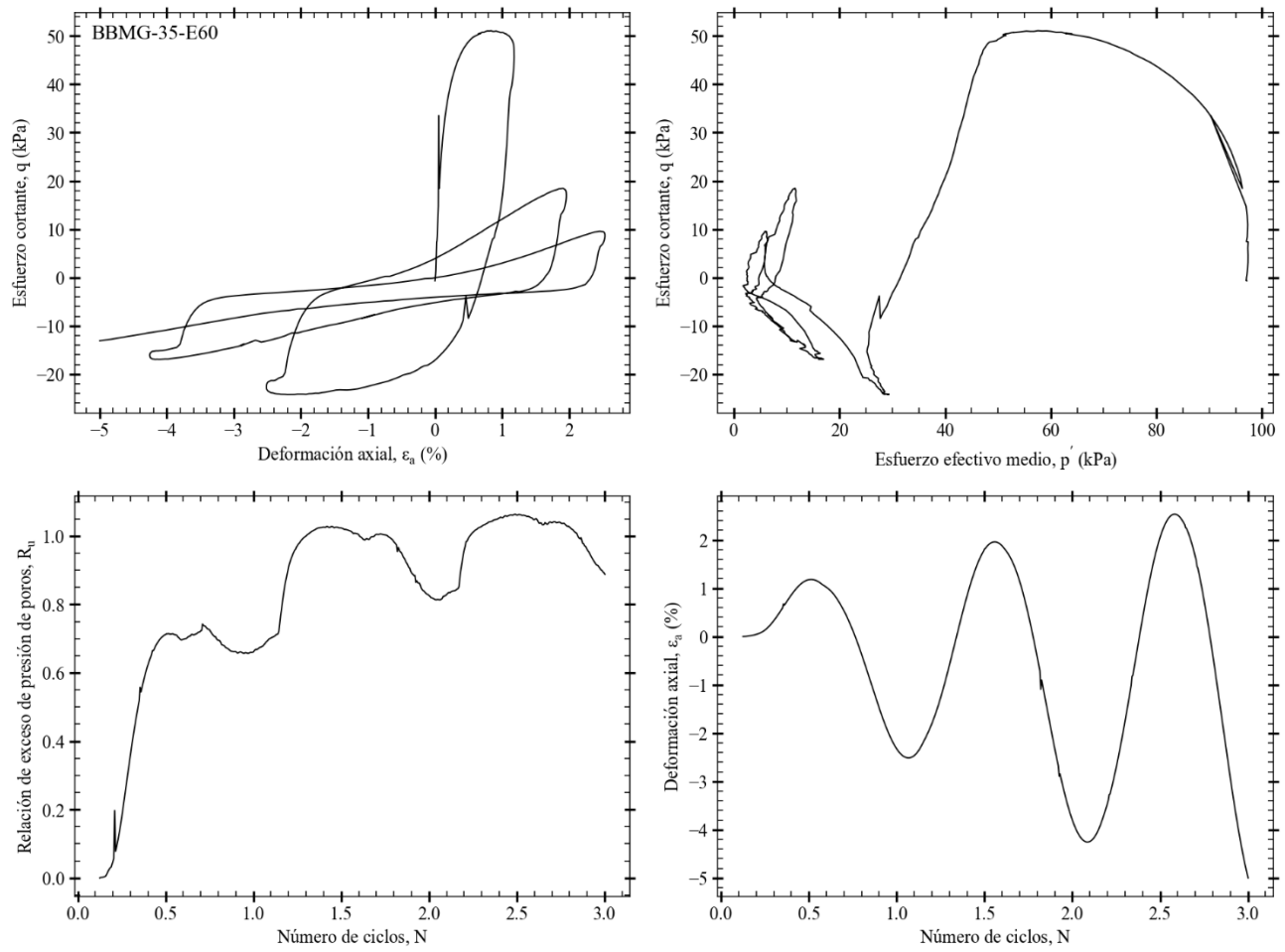


Figura A.5.1.13. Respuesta cíclica del espécimen BBMG-35-E60.

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Catalina Sofía Estefanía Brule Arriagada
Título de la memoria : Sistema Revisado de Clasificación de Suelos (SRCS) como herramienta para la susceptibilidad a la licuación.
Fecha de la presentación oral : 10 de Abril, 2026

Profesor(es) Guía : Gonzalo Montalva Alvarado
Profesor(es) Revisor(es) : Daniella Escribano Leiva
Concepto :
Calificación :

Resumen

La susceptibilidad a la licuación en mezclas arena–finos constituye una preocupación, debido a la dificultad de representar suelos transicionales mediante criterios convencionales basados en contenido de finos e índice de plasticidad. En este estudio se evalúa la capacidad del Sistema Revisado de Clasificación de Suelos para organizar e interpretar el comportamiento cíclico de mezclas arena–finos mediante ensayos triaxiales cíclicos no drenados. Se desarrolló un programa experimental sobre mezclas reconstituidas elaboradas con arena Biobío y tres tipos de finos, considerando variaciones en el contenido de finos y en la relación de vacíos. La respuesta se examinó a partir de la acumulación de deformación, la generación de presión de poros, las trayectorias de esfuerzos efectivos y los mecanismos de inestabilidad. El análisis confirma que la respuesta cíclica depende de la interacción entre el estado inicial, el tipo y el contenido de finos, y que la mayor variabilidad del comportamiento se concentra en la zona transicional. Finalmente, se confirma que la influencia de los finos comienza a manifestarse para contenidos inferiores al 20%, y que la sensibilidad eléctrica presenta mayor capacidad de discriminación que el índice de plasticidad para organizar la respuesta observada.