



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

Estudio del comportamiento dinámico y propiedades geotécnicas de suelo transparente como elemento de modelamiento físico

Memoria de Título presentada por

Matías Enrique Garrido Álvarez

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía

Javier Orlando Ubilla Villagrán

Profesor Correferente

Sergio Andrés Carrasco Cisterna

Enero de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Estudio del comportamiento dinámico y propiedades geotécnicas de suelo transparente como elemento de modelación física

Nombre del candidato(a): Matias Enrique Garrido Álvarez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: San Joaquín

Departamento: Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Javier Orlando Ubilla Villagrán, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 18/03/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 16/03/2026

Firma: 

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA MEMORIA:

Estudio del comportamiento dinámico y propiedades geotécnicas de suelo transparente como elemento de modelamiento físico

AUTOR:

MATÍAS ENRIQUE GARRIDO ÁLVAREZ

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

	<u>Nombre</u>	<u>Firma</u>
Prof. Guía	Javier Ubilla Villagrán	
Miembro 1 Comisión	Sergio Carrasco Cisternas	
Miembro 2 Comisión	Esteban Sáez Robert	

Santiago, Chile, Enero de 2026

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO Y PROPIEDADES GEOTÉCNICAS DE SUELO TRANSPARENTE COMO ELEMENTO DE MODELAMIENTO FÍSICO

Matías Garrido¹, Javier Ubilla¹, Esteban Sáez², Sergio Carrasco¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

² Pontificia Universidad Católica de Chile

Resumen

Los fenómenos complejos en geotecnia, como la interacción suelo–estructura, suelen analizarse mediante modelos basados en supuestos simplificadores que no siempre representan adecuadamente el comportamiento real del suelo. En este contexto, el uso de métodos complementarios resulta fundamental para mejorar la comprensión del comportamiento mecánico y reducir las incertidumbres asociadas a la modelación. La modelación física a escala y el suelo sintético transparente (SST) son herramientas útiles para estudiar estos fenómenos, esta modelación generalmente se complementa con uso de sensores, acelerómetros o transductores diferenciales de variación lineal (LVDT, por sus siglas en inglés), que permiten obtener mediciones de parámetros de interés como desplazamientos o deformaciones en el suelo. Sin embargo, las mediciones obtenidas con los sensores entregan valores en puntos locales dentro de la masa de suelo, lo que no permite estudiar el comportamiento del suelo como un continuo, es por esto que en esta investigación se confecciona y caracteriza dinámicamente (mediante ensayos de laboratorio normalizados) el SST, que está compuesto por materiales granulares y una fase líquida. El objetivo es representar una arena natural (SP según USCS) para estudiar deformaciones y desplazamientos tratando el suelo como un medio continuo, a través de cargas cíclicas aplicadas y visualizaciones en tiempo real a través de técnicas de correlación digital de imágenes (DIC). Los principales resultados arrojan una notable transparencia en las probetas elaboradas, una congruencia en las curvas de degradación de rigidez y de amortiguamiento en función de la deformación de corte, obteniendo valores de V_s y de $G_{máx}$ comparables a las de la arena natural objetivo, por último, mediante el uso de DIC se comprueban las trayectorias de deformaciones generadas en una probeta cargada cíclicamente.

Palabras claves: suelo sintético transparente, caracterización dinámica, DIC

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este trabajo. En primer lugar, a mis profesores Esteban, Sergio y Javier, quienes me guiaron a lo largo de esta investigación y despertaron en mí la curiosidad por esta área de la ingeniería civil. Extiendo también mi gratitud al financiamiento otorgado por el proyecto Fondecyt N.º 1250685, “*Experimental and Numerical Study of Dynamic Soil-Structure Interaction in Shear Wall Buildings Founded on Bored Piles*” de la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo de nuestro país, así como al equipo de laboratorio y a los estudiantes de posgrado de la UC, quienes me brindaron apoyo desde el inicio de la investigación.

A mi madre y a mi abuela, por acompañarme en todo el camino universitario y asegurar que nunca me faltara nada. A Isidora, quien me entregó amor y fue un pilar fundamental durante estos años, con su constante respaldo y apoyo emocional en cada decisión que tomé, y que estuvo a mi lado en incontables noches de trabajo y estudio.

Finalmente, a los amigos que la universidad me regaló, con quienes compartí momentos de risas, alegría y compañerismo. Con ellos discutimos soluciones a los desafíos que se nos presentaban en la carrera, conformamos los mejores grupos de trabajo y estudio que tuve en la universidad y construimos lazos que espero mantener siempre.

1 Introducción

La modelación física ha sido ampliamente utilizada en geotecnia para estudiar fenómenos complejos como la interacción suelo – estructura (SSI), flujos de agua a través de masas de suelo, mejoramiento de suelos, entre otros (Zhao, 2007; Ahmed et al., 2011). Si bien existen modelos analíticos que permiten analizar estos fenómenos con métodos numéricos o investigaciones de campo, estos presentan limitaciones que no permiten comprender del todo el comportamiento de masas de suelo como un continuo (Rocha, 1957). Los modelos físicos surgen como una alternativa o complemento a los análisis permitiendo comprender mejor el comportamiento del suelo, ya que posibilita simular a escala y observar en detalle las deformaciones internas, distribuciones de esfuerzos y fallas en el material de estudio. Esta modelación, en general se restringe a algunos puntos discretos asociados a la cantidad de sensores como acelerómetros que se insertan en el suelo y que a su vez perturban el material. Esto provoca mediciones alteradas y deformaciones intrusivas no esperadas, surgiendo así la necesidad de obtener información en forma continua que entregue una medición global, y no local (Segaline et al., 2022). Existen métodos no intrusivos basados en imágenes que permiten capturar el comportamiento (desplazamientos y deformaciones) como la tomografía y los rayos X. Aun así, estos métodos no permiten capturar en tiempo real el comportamiento del suelo, además de resultar costosos y su viabilidad depende de factores como la resolución o la profundidad de penetración (Liu & Iskander, 2010). Diversos autores han investigado este problema, encontrando como solución el uso de suelo transparente sintético (Yu et al., 2025; L. Zhang et al., 2024).

El suelo transparente es un medio de dos fases que consiste en una mezcla de agregados de materiales sintéticos y fluidos que deben poseer igual índice de refracción, permitiendo así el paso de la luz sin distorsionarse (W. Zhang et al., 2022). Al combinar el uso de estos materiales con tecnología que permite capturar desplazamientos y deformaciones en tiempo real, como la *Digital Image Correlation* (DIC) o la *Particle Image Velocimetry* (PIV), se han obtenido resultados consistentes que permiten respaldar el uso de suelo transparente como elemento para realizar modelos físicos que representen problemas ingenieriles durante las últimas dos décadas (Ganiyu et al., 2016). Esta metodología de modelación se ha aplicado con éxito en estudios de fundaciones, columnas de grava y vibración sísmica. (Tong et al., 2024; W. Zhang et al., 2024).

Se han utilizado diversos materiales como suelo sintético, para el modelamiento físico de arenas el más común corresponde a cuarzo fundido en combinación con aceites minerales o soluciones de glicerina, lo que permite modelar físicamente arena natural (Guzman & Iskander, 2013). Kong et al. (2018) demostraron que el suelo transparente fabricado con cuarzo fundido y aceite mineral presenta módulos de corte y relaciones de amortiguamiento comparables a las de arenas naturales, con umbrales elásticos de deformación de corte γ en el rango de 2×10^{-5} a 3×10^{-4} y valores de amortiguamiento entre 4% y 10%, dependiendo del fluido utilizado. A nivel nacional no existen actualmente documentos científicos que hayan demostrado el uso de suelo sintético transparente en la modelación física geotécnica.

El objetivo de este trabajo es comprobar si es posible replicar las propiedades geotécnicas mediante ensayos físicos en laboratorio de una arena mal graduada (SP según clasificación USCS), de densidad $\rho = 1.62 \text{ g/cm}^3$, correspondiente a una $D_r = 70\%$, y de $V_s = 243 \text{ m/s}$, mediante el uso de suelo sintético compuesto por materiales como el cuarzo fundido, y alternativos como esferas de vidrio de borosilicato, donde el desafío principal está en la disparidad del índice de refracción (RMI) de este material en comparación al cuarzo, 1.47 y 1.4585 respectivamente. Para ello es fundamental utilizar fluidos como soluciones de glicerina, aceites o soluciones de bromuro de calcio para alcanzar el RMI objetivo en la mezcla. Adicionalmente, se realizarán ensayos dinámicos utilizando cuarzo fundido y esferas de vidrio de borosilicato para caracterizar sus propiedades dinámicas, finalmente se utilizará la tecnología DIC o PIV para capturar los desplazamientos de una probeta ensayada en el equipo de triaxial cíclico.

2 Hipótesis

- Las propiedades geotécnicas dinámicas son consistentes entre los diferentes ensayos, y representan correctamente el comportamiento del suelo natural.
- La transparencia lograda al igualar los índices de refracción permite visualizar correctamente desplazamientos en tiempo real en un modelo físico.

3 Objetivos

3.1 Objetivo General

Evaluar la representatividad de las propiedades geotécnicas dinámicas – incluyendo rigidez, amortiguamiento y su evolución con la deformación – y la congruencia de las trayectorias de deformaciones de un suelo sintético transparente en comparación con un suelo natural, con el fin de determinar su idoneidad como medio de modelación física.

3.2 Objetivos específicos

OE1: Seleccionar y ajustar los componentes sólidos y líquidos del suelo sintético transparente, asegurando la coincidencia de sus índices de refracción para obtener una mezcla óptimamente homogénea.

OE2: Caracterizar experimentalmente las propiedades geotécnicas dinámicas $D(\gamma)$ y $G(\gamma)$ del suelo sintético transparente mediante ensayos de laboratorio normalizados.

OE3: Realizar ensayos de carga cíclica con inclusión de trazadores, evaluando la transparencia del medio y la capacidad de monitorear las trayectorias de deformación mediante técnicas de correlación digital de imágenes (DIC, PIV).

4 Marco teórico

4.1 Modelación física en geotecnia

La modelación física de escala reducida es utilizada en geotecnia para estudiar fenómenos complejos que no son posibles de estudiar mediante prototipos a escala real, entre ellos la interacción suelo – estructura, licuefacción dinámica, flujos de agua en masas de suelo, etc. Una de las principales ventajas de su uso es la posibilidad de ajustar variables de estudio como la geometría, las condiciones experimentales, o la amplitud máxima de cargas cíclicas efectuadas a $1-g$ o $n-g$, sin tener que recurrir al uso de modelos numéricos, que suelen depender de una gran cantidad de parámetros y condiciones.

La modelación a escala reducida se suele llevar a cabo mediante un contenedor laminar que permita replicar las condiciones de borde de un suelo natural en la realidad. Otra ventaja del uso de contenedores laminares es la flexibilidad lateral que provee al sistema, ya que permiten compatibilizar las deformaciones del suelo en los bordes del modelo debido a que representa las condiciones cinemáticas de una viga de corte, simulando extremos libres (Segaline et al., 2022).

Para realizar una representación a escala reducida de un modelo de escala real, se deben utilizar factores que permitan compatibilizar ambas escalas. Si el comportamiento de los materiales del modelo es lineal, la extrapolación se vuelve sencilla, pero si el comportamiento de los materiales incursiona en el rango no lineal, o si el modelo incluye interacciones entre varios materiales diferentes, los factores que permitan replicar el comportamiento de escala reducida a real se vuelven más complejos (Wood et al., 2002). Por este motivo, al realizar modelos físicos en geotecnia, se busca mantener las principales leyes gobernantes. Según Moncarz (1981), los niveles de fidelidad de los parámetros pueden categorizar a los modelos entre real, adecuado y distorsionado. Iai (1989) propuso diversas leyes de escalamiento (scaling laws) para modelos de suelos saturados sometidos a cargas sísmicas de $1g$, que son derivados de las ecuaciones que rigen el comportamiento del medio, con variables que son fundamentales en modelos dinámicos. Como se muestra en la Tabla 4-1, estos factores consideran variables como el tiempo, las tensiones, deformaciones, módulos de rigidez, permeabilidad y propiedades del fluido intersticial. De este modo, al escalar correctamente tensiones y deformaciones, se puede considerar que las curvas de esfuerzo – deformación del modelo pueden ser equivalentes a las del prototipo real (Rocha, M., 1957).

Tabla 4-1. Factores de escala para modelos de cargas dinámicas gravitacionales de 1g. (Iai, 1989)

Items		Scaling factors (prototype/model)
x	length	λ
ρ	density of saturated soil	λ_ρ
ϵ	strain of soil	λ_ϵ
t	time	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$
ϵ^0	strain of soil due to creep, temperature, etc.	λ_ϵ
σ	total stress of soil	$\lambda\lambda_\rho$
σ'	effective stress of soil	$\lambda\lambda_\rho$
D	tangent modulus of soil, which generally depends on histories of effective stress, strain, etc.	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$
K_s	bulk modulus of the solid grains of soil	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$
p	pressure of pore water and/or external water	$\lambda\lambda_\rho$
k	permeability of soil	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}/\lambda_\rho$
u	displacement of soil and/or structure	$\lambda\lambda_\epsilon$
$\dot{u}$	velocity of soil and/or structure	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$
$\ddot{u}$	acceleration of soil and/or structure	1
w	average displacement of pore water relative to the soil skeleton	$\lambda\lambda_\epsilon$
$\dot{w}$	rate of pore water flow	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$
n	porosity of soil	1
K_f	bulk modulus of pore water and/or external water	$\lambda\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$
EI	flexural rigidity (per unit breadth of the beam)	$\lambda^4\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$
EA	longitudinal rigidity (per unit breadth of the beam)	$\lambda^3\lambda_\rho/\lambda_\epsilon$
θ	inclination of the beam	λ_ϵ
M	bending moment of the beam (per unit breadth of the beam)	$\lambda^3\lambda_\rho$
S	shear force of the beam (per unit breadth of the beam)	$\lambda^2\lambda_\rho$
F	axial force of the beam (per unit breadth of the beam)	$\lambda^2\lambda_\rho$
ρ_f	density of pore water and/or external water	λ_ρ
ρ_b	density of the beam (mass per unit length and breadth of the beam)	$\lambda\lambda_\rho$
T	traction acting on the soil specified on the boundary	$\lambda\lambda_\rho$
$\bar{u}$	displacement of the soil and/or the beam specified on the boundary	$\lambda\lambda_\epsilon$
$\bar{p}$	pressure of pore water and/or external water specified on the boundary	$\lambda\lambda_\rho$
$\bar{w}$	average displacement of pore water, specified on the boundary, relative to the soil skeleton, often specified as rate of flow on the boundary	$\lambda\lambda_\epsilon$
$\bar{\theta}$	inclination of the beam specified at the boundary	λ_ϵ
$\bar{M}$	bending moment of the beam specified at the boundary (per unit breadth of the beam)	$\lambda^3\lambda_\rho$
$\bar{S}$	shear force of the beam specified at the boundary (per unit breadth of the beam)	$\lambda^2\lambda_\rho$
$\bar{F}$	axial force of the beam specified at the boundary (per unit breadth of the beam)	$\lambda^2\lambda_\rho$
$\bar{i}$	hydraulic gradient of external water specified at the boundary	λ_ρ

Sin embargo, existe una limitación al momento de modelar físicamente debido a que los instrumentos de medición (sensores como acelerómetros, transductores, o *strain gauges*), son una medida intrusiva que puede perturbar las mediciones de esfuerzos o deformaciones en la masa de suelo, y permiten monitorear solamente fenómenos en puntos discretos o locales dentro del modelo independientemente de la extensión que este posea. De esta forma, estudiar el suelo como un campo continuo se vuelve un desafío (Segaline et al., 2021).

De esta manera, se han desarrollado nuevas alternativas como el uso del suelo transparente sintético y de sistemas ópticos como DIC o PIV; también han emergido variantes como la fluorescencia inducida por láser en plano (PLIF) para visualización avanzada en 3D (Tong et al., 2024), que permiten capturar de manera no intrusiva mediciones de deformaciones, y que podrían ser utilizados para obtener mediciones tridimensionales para varios tipos de problemas asociados a la interacción suelo – estructura (Liu & Iskander, 2010).

El método DIC corresponde a una técnica clásica de reconocimiento de patrones donde se comparan dos imágenes para obtener el desplazamiento relativo entre ellas. Se ha utilizado recientemente en geotecnia para medir deformaciones del suelo bajo esfuerzos triaxiales compresivos, para determinar a qué punto de escalamiento es necesario considerar la heterogeneidad del suelo de estudio (Rechenmacher et al., 2007).

La forma de la función discreta de correlación C propuesta por (Huang & Tsai, 1981) es:

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) g(m + \Delta x, n + \Delta y) \quad (1)$$

Donde M y N corresponden a las dimensiones de las imágenes en cuestión, m y n son dos variables y f , g son las intensidades en la escala de grises de las imágenes. Esta función se itera según la cantidad de

imágenes a analizar en las distancias del plano $x - y$, Δx y Δy respectivamente. Si la función encuentra un peak en las coordenadas x_p, y_p , la mejor aproximación de f ocurre cuando el cambio de imágenes ocurre en g . En otras palabras, estos valores indican el desplazamiento óptimo entre dos imágenes correlacionadas, es decir, el cambio de posición de los patrones entre la imagen original y la imagen deformada.

Para normalizar esta función, Giachetti (2000) ha propuesto dos funciones (NCC y ZNCC) que permitan corregir las diferencias en los niveles de intensidad promedio de las imágenes, de modo que la comparación entre las imágenes se base solamente en la variación de patrones y no así en el brillo o contraste de cada imagen.

$$NCC = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e(m, n) g_e(x + m, y + n)}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f_e(m, n)^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g_e(m, n)^2}} \quad (2)$$

$$ZNCC = \frac{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f_e(m, n) - \bar{f}_e][g_e(x + m, y + n) - \bar{g}_e]}{\sqrt{\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [f_e(m, n) - \bar{f}_e]^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} [g_e(m, n) - \bar{g}_e]^2}} \quad (3)$$

Esta función ha sido mejorada por Sadek et al., (2003) mediante el uso de la FFT (Transformada rápida de Fourier o *Fast Fourier Transform*, según sus siglas en inglés), ya que usualmente trabajar en el dominio de la frecuencia es más eficiente, especialmente cuando las imágenes son grandes o cuando existen numerosas ventanas o saltos. Debido a que la resolución original de las imágenes está limitada a la dimensión de un píxel, se puede obtener una estimación del desplazamiento a niveles subpíxel. Para ello, se ajusta la región alrededor del pico de la función de correlación en tres dimensiones, lo que permite determinar el máximo de forma matemática con una precisión mayor que la unidad de píxel.

En caso de realizarse correlación digital de imágenes en 3D (estéreo), se utilizan al menos dos cámaras digitales ubicadas de manera oblicua entre ellas. Previo a la medición, se requiere realizar una calibración a través de una toma de imágenes de una placa con puntos de calibración ubicada en el campo de visión de ambas cámaras, variando su posición en inclinación en todos los planos. En base a esta calibración se obtienen parámetros como distancias focales, distorsiones de los lentes, posición y orientación de cámaras (ángulo entre ellas), que permiten obtener la representación tridimensional del objeto en estudio, y sus campos de desplazamientos y deformaciones.

4.2 Suelo sintético transparente

El desarrollo del suelo sintético transparente (SST) ha significado un avance relevante en la modelación física geotécnica, permitiendo la visualización directa y no invasiva del comportamiento interno del suelo. Al utilizarse en conjunto con técnicas de visualización directa como PIV o DIC, permiten estudiar fenómenos como la interacción suelo-estructura, fallas localizadas, licuefacción, propagación de ondas sísmicas y estabilidad de taludes (Ahmed et al., 2011; Sun & Liu, 2014; L. Zhang et al., 2024; Zhong et al., 2022).

El suelo transparente es un medio sintético de dos fases compuesto por un material granular sólido sintético y un líquido o fluido de poro que posean idénticos índices de refracción (Refractive Index Matching, RMI) entre ambas fases. El índice de refracción es la razón entre la velocidad de la luz en el vacío con respecto a la velocidad de la luz en el medio de estudio (Ganiyu et al., 2016). Cuando los índices coinciden, la luz se transmite a través del medio sin ser desviada ni dispersada, lo que permite visualizar el comportamiento interno del suelo utilizando cámaras o técnicas láser sin interferencia óptica.

Este tipo de suelo sintético ha sido utilizado desde principios de los años 2000, principalmente para ensayos a pequeña escala en laboratorios de geotecnia. Los estudios han demostrado que, bajo ciertas condiciones, el suelo transparente puede reproducir propiedades físicas y mecánicas similares a las de

suelos naturales (Kong et al., 2018). Entre los materiales comúnmente utilizados como fase sólida se encuentra el *Fused quartz*, o cuarzo fundido, que se obtiene al fundir cristales de cuarzo a 2000°C y luego enfriarlos. La forma, la estructura y las propiedades químicas obtenidas son comparables a las de la arena de silicato natural (Guzman & Iskander, 2013). Por otra parte, es ampliamente utilizado el gel de sílica o *Silica gel*, que está compuesto por una red de poros microscópicos interconectados de diámetros del orden de $5 \cdot 10^{-10} - 300 \cdot 10^{-10} [m]$. Se caracteriza por tener un alto índice de vacíos aparente debido a la porosidad interna del agregado y se utilizan para modelar arena media a gruesa (Zhao et al., 2010).

Por otra parte, la fase líquida suele consistir en aceites minerales, soluciones de glicerina, mezclas de bromuro de calcio o soluciones acuosas inorgánicas, seleccionadas para igualar el índice de refracción del material sólido y garantizar la transparencia del sistema. El material líquido utilizado debe cumplir con cuatro características: seguro y saludable, no ser excesivamente volátil, baja viscosidad y bajo costo (Bathurst, 2011). Una vez realizada la mezcla, se procede a quitar las burbujas de aire de la mezcla en el contenedor para mejorar la transparencia del sistema (Iskander & Liu, 2010).

Adicionalmente, para complementar el uso de suelo transparente sintético con la técnica de observación DIC o PIV, se utilizan partículas fluorescentes que puedan ser “trackeadas” utilizando radiación por láser, por ejemplo, para calcular velocidades de flujos dentro del suelo (Yu et al., 2025).

4.3 Índice de refracción entre fases

El índice de refracción se mide con un refractómetro digital, agregando gotas de la solución obtenida al equipo, y se busca lograr la transparencia óptica al igualar el índice de refracción con el del sólido. El refractómetro digital mide el índice de refracción de muestras líquidas utilizando una luz LED, un prisma y un sensor óptico que permite determinar la reflexión total interna. Primero la luz LED pasa a través del prisma, el cual está en contacto con el líquido que se desea medir, al llegar al líquido, se refleja y refracta; pero en cierto ángulo (conocido como ángulo crítico), la luz no se continúa refractando y solamente se refleja en el prisma tras alcanzar el líquido, a través de un sensor óptico se puede medir este ángulo, luego mediante la ley de Snell (ver Figura 4-1) se puede obtener directamente el índice de refracción en base a la ecuación:

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2) \quad (4)$$

Donde n corresponde al índice de refracción de cada medio.

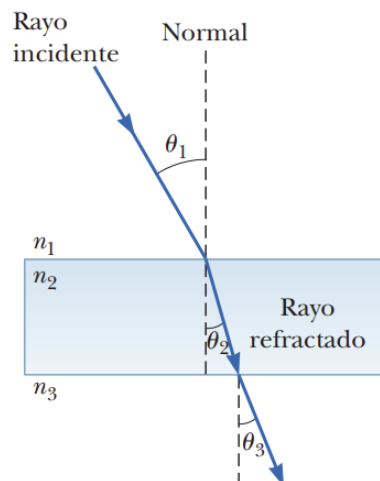


Figura 4-1. Ley de Snell para cálculo de índices de refracción (Serway, 2009).

Al evaluar $\theta_1 = 90^\circ$, y conociendo el índice de refracción del medio inicial (el prisma), se puede obtener el índice de refracción del medio 2, correspondiente a la fase líquida del suelo transparente en el caso de esta investigación. Como la luz no se refracta en un medio sólido, no es posible para el refractómetro digital detectar el punto donde se produce el ángulo crítico, y no se entrega la medición.

Por este motivo se toma el índice de refracción teórico del vidrio de borosilicato, que corresponde a 1.47 (Budwig, 1994), y se iguala a partir del líquido, cuyo índice de refracción si puede ser medido con un refractómetro, el procedimiento se repite con el cuarzo fundido, donde el índice de refracción teórico de las partículas es de 1.4585 (Ganiyu et al., 2016).

El índice de refracción del material es altamente sensible a la temperatura que posea el líquido al momento de realizar la medición, disminuyendo a medida que se aumenta la temperatura del líquido, debido a la expansión volumétrica del material (Bashkatov & Genina, 2003).

4.4 Curva granulométrica homotética

Para representar la arena natural, de clasificación SP según la USCS, se debe replicar la curva granulométrica obtenida mediante el procedimiento descrito en la sección 8.102.1 del Manual de Carreteras Volumen N°8 (2024), pero como el SST está constituido por esferas de vidrio de borosilicato y partículas de cuarzo fundido de diámetros comerciales, no es posible replicar la curva granulométrica exacta, y se realiza una traslación en el eje de las abscisas para poder representarla, de forma de conseguir una curva homotética. Para esto, se utiliza un método de escalamiento de muestras o curvas granulométricas homotéticas las cuales utilizan un factor de escala " k ", que se multiplica a los diámetros de las cribas o mallas que se utilizaron para encontrar la distribución granulométrica de la arena natural, para obtener el diámetro comercial más cercano al original, es decir:

$$D_{\% \text{ que pasa}} \cdot k = D_{\text{comercial}} \quad (5)$$

Para ello se toma el diámetro efectivo D_{10} , y los diámetros D_{30} , D_{60} y D_{90} , mediante los cuales se pueden obtener distintos valores de k como el cociente entre el diámetro comercial y los diámetros más representativos de la curva granulométrica original.

Como se obtienen diversos valores de k , al multiplicarlos por los diámetros originales, la curva granulométrica que se aplica al SST no se obtiene una forma perfectamente homotética, por lo que para este trabajo se consideró la media geométrica entre los valores de k calculados, debido a que representa de mejor manera valores que están interconectados por una multiplicación, según:

$$\bar{k} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n x_i} \quad (6)$$

Donde x_i corresponde a los valores de k obtenidos y $n = 4$, en el caso de utilizar los diámetros mencionados anteriormente. Adicionalmente es posible estimar el RMSE (Root Mean Square Error), que permite evaluar la precisión o el nivel de dispersión de $\bar{k}$ en función de los k obtenidos, a partir de la expresión:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\bar{y}_i - y_i)^2}{n}} \quad (7)$$

4.5 Ensayos cíclicos y dinámicos

Para evaluar la pertinencia de las propiedades dinámicas del suelo sintético transparente, se requiere realizar ensayos que permitan obtener el módulo de corte G del suelo, el amortiguamiento D y sus evoluciones con la deformación de corte o distorsión angular γ .

4.5.1 Ensayo de Columna Resonante (RC)

El ensayo de columna resonante funciona en base a vibraciones torsionales aplicadas en el extremo superior de una probeta de suelo previamente constituida, a determinadas frecuencias y niveles de confinamiento, que permiten obtener el módulo de corte G_{max} , el amortiguamiento D y su evolución

con la deformación de corte γ , para valores de $10^{-6} < \gamma < 10^{-4}$. Estas vibraciones pueden ser forzadas, es decir fijando valores de la amplitud de $M_t(t)$, o bien pueden ser de tipo libres, donde el ángulo inicial que se aplica en el extremo superior de la probeta θ_0 es un valor fijo y luego se deja oscilar la probeta libremente sin controlar la amplitud a lo largo del tiempo. Debido a que al aplicar vibraciones libres la deformación de corte γ no es constante a lo largo de la probeta, se prefiere utilizar el método de vibraciones forzadas suponiendo que el giro relativo entre el actuador (que aplica el momento torsor) y la probeta es nulo. La solución a la ecuación que permite obtener el módulo de corte G (Semblat & Pecker, 2009) es del tipo:

$$p_n \cdot \tan(p_n) = \frac{\bar{J}}{\bar{J}_0} \quad (8)$$

Donde:

$$p_n = \frac{\omega_n \cdot L}{V_s} \quad (9)$$

Y ω varía en función del periodo del sistema suelo – actuador. Para poder determinar la solución a la ecuación, p_n corresponde a la única incógnita debido a que los momentos polares máxicos $\bar{J}$ y $\bar{J}_0$ son propiedades geométricas del suelo y del actuador (entregado por el fabricante). Luego se puede realizar el ensayo a distintas frecuencias para encontrar la frecuencia de resonancia del sistema, que será aquella que genere un $\theta_{max}(\omega)$, dicha frecuencia se reemplaza en la ecuación (9) evaluando $n = 1$, de donde puede despejarse el valor de V_s , correspondiente a la velocidad de la onda de corte, y con ello, mediante la expresión:

$$G_{max} = \rho \cdot V_{smax}^2 \quad (10)$$

Se obtiene el módulo de corte máximo G_{max} . Ahora bien, se requiere conocer la distorsión angular γ , según:

$$\gamma = \frac{r \cdot \theta_{max}^* \cdot p_1}{\sin(p_1) \cdot L} \cdot \cos\left(\frac{p_1 \cdot x}{L}\right) \cdot e^{i\omega^* t} \quad (11)$$

Utilizando la aproximación de ángulos pequeños, la distorsión angular se simplifica a:

$$\gamma = r \cdot \frac{\theta_{max}^*}{L} \quad (12)$$

Siendo r el radio de la probeta, que por convención se utiliza como $r = \frac{d}{3}$ y L el largo de la probeta. Al repetir el ensayo para distintos valores de M_t se obtendrán distintos valores de $\bar{\gamma}$, y por ende distintos valores de V_s , los cuales pueden reescribirse en función del módulo de corte, y así obtener la curva de la Figura 4-2, que representa la degradación de rigidez del suelo.

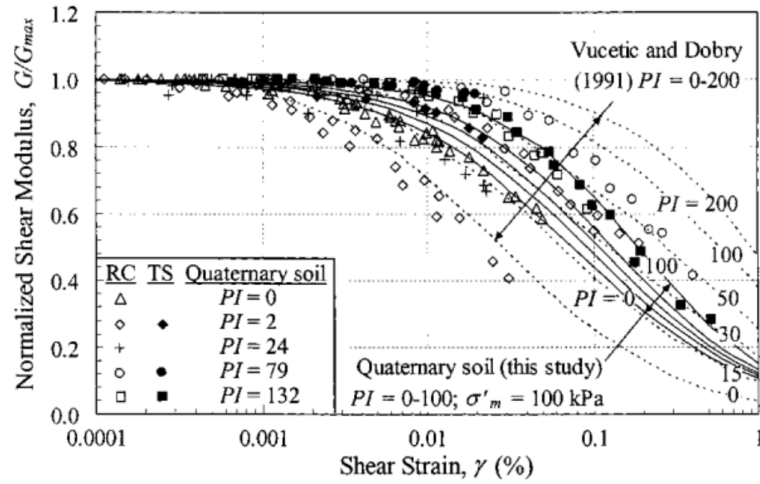


Figura 4-2. Curva de degradación de rigidez de suelo (J. Zhang et al., 2005).

Luego para obtener el amortiguamiento, que corresponde a la energía disipada durante la deformación, se debe analizar el ciclo de histéresis (ver Figura 4-3), el cual se forma con los ciclos de carga y descarga sobre la probeta de suelo, y del cual se puede desprender la siguiente relación:

$$D = \frac{\Delta W}{4\pi W} \quad (13)$$

De manera análoga al razonamiento para obtener la curva de degradación de la rigidez, se puede obtener la curva del amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ , como se observa en la Figura 4-4.

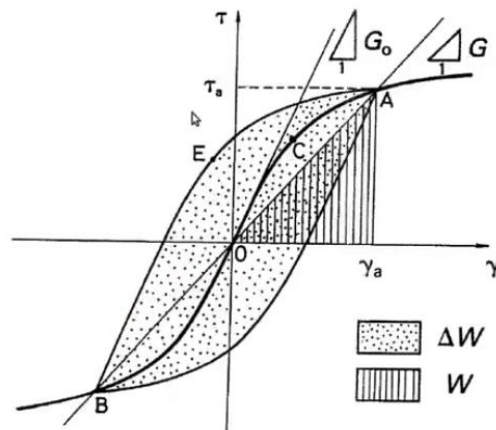


Figura 4-3. Ciclo de histéresis de suelo.

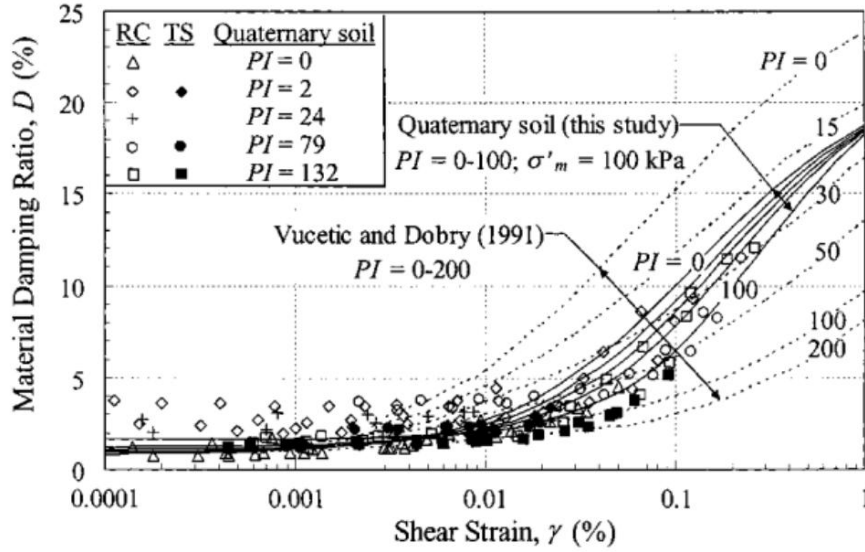


Figura 4-4. Curva de amortiguamiento en función de la deformación de corte γ (J. Zhang et al., 2005).

Para completar las curvas presentadas se requiere incursionar en deformaciones mayores a valores de $\gamma \geq 10^{-4}$, donde la aproximación de ángulos pequeños deja de tener validez, por lo que se aplica el ensayo de torsión cíclica y triaxial cíclico para alcanzar valores de deformaciones $10^{-4} < \gamma < 10^{-2}$.

4.5.2 Ensayo de Torsión Cíclica (TS)

El ensayo de torsión cíclica se realiza en el mismo equipo que el de columna resonante, donde se utilizan vibraciones armónicas torsionales de más baja frecuencia en la parte superior de la probeta, que puede ser sólida o hueca. En este caso, el módulo de corte G se obtiene como el módulo secante de un loop de histéresis completo a una amplitud máxima fija. Para el caso del amortiguamiento, se obtiene integrando el área encerrada por el loop y normalizando con respecto a la energía de deformación equivalente elástica a la misma amplitud. La lógica es idéntica a la del ensayo triaxial cíclico que se describe en la sección siguiente.

Normalmente el equipo combinado de RC, también permite realizar pruebas de vibraciones libres. En este caso, el sistema se carga en la carga superior en unos pocos ciclos armónicos y luego se deja vibrar en forma libre hasta que se detenga. Las amplitudes de los ciclos del decaimiento permiten ajustar un decremento logarítmico y a través de dicho valor un coeficiente de amortiguamiento ξ , que corresponde al amortiguamiento del sistema suelo – actuador, análogo al modelo de Kelvin – Voigt para un sistema estructural de 1 GDL. Un amortiguamiento viscoso de este tipo tiene el problema de resultar dependiente de la frecuencia, lo que usualmente no ocurre en suelos. Por ello, en dinámica de suelos se opta más bien por un análisis de los módulos complejos, donde:

$$\tau^* = G(1 + 2i\xi)\gamma^* \quad (14)$$

Se puede tomar la parte real de la expresión e integrar para obtener:

$$\Delta W = 2\pi\xi G\gamma_0^2 \quad (15)$$

Lo que independiza al sistema de la frecuencia y permite obtener el amortiguamiento del suelo $D = \xi$.

4.5.3 Ensayo Triaxial Cíclico (TX)

El ensayo triaxial cíclico es utilizado ampliamente en geotecnia ya que permite caracterizar cíclicamente el suelo bajo condiciones drenadas o no drenadas, lo que simula condiciones de terreno durante alguna

carga cíclica como un sismo, por ejemplo. Su funcionamiento se basa en aplicar cargas cíclicas de tipo axial de baja frecuencia de 0.1 o 1 [Hz] normalmente, sobre una probeta cilíndrica de suelo saturada, y sellada por una membrana impermeable en una cámara triaxial que permite aplicar confinamiento sobre dicha probeta. La muestra de suelo, que puede ser reconstituida o intacta, debe ser consolidada y completamente saturada, lo que se logra permitiendo el flujo de agua través de las conexiones en la parte superior e inferior de la probeta, el cual debe medirse durante la carga cíclica a través de la presión de poros.

Al igual que el TX convencional, este ensayo es de tipo destructivo, donde el criterio de falla se establece como el número de ciclos que permite alcanzar un límite de deformación axial en doble amplitud de $\varepsilon_{da} = 10\%$ (ya sea durante la carga o la descarga), o alcanzar $U = 100\%$, donde U es la presión de poros. Dependiendo del tipo de suelo, la deformación axial en doble amplitud se puede reducir a 5% o incluso 2.5% para identificar la falla. Al aplicar la carga cíclica axial sobre la probeta, esta generalmente produce un aumento en la presión de poros (en condiciones no drenadas), lo que se traduce en un decrecimiento en los esfuerzos efectivos, y en un aumento en la deformación axial del espécimen ensayado. En el caso drenado, no se produce un aumento en la presión de poros.

En el caso de caracterizar la propensión a la licuación de un suelo, se obtiene el esfuerzo aplicado en carga σ_l v/s el número de ciclos N , o la deformación axial durante la carga/descarga en función del número de ciclos N . Usualmente, basta con los gráficos de ε_{da} en función de N , $\pm\sigma_{dc}$ en función de N y U en función de N , donde σ_{dc} corresponde al esfuerzo cíclico aplicado durante un ciclo.

En el caso de realizarse el ensayo con fines de determinar la degradación de rigidez del suelo, y el amortiguamiento, debe obtenerse para cada ciclo de histéresis (carga v/s deformación) el amortiguamiento D según:

$$D = \frac{A_L}{4\pi A_T} \times 100\% \quad (16)$$

Donde A_L y A_T corresponden al área encerrada por el “loop”, y al área del triángulo de la Figura 4-3.

Para calcular el módulo de corte G , se debe calcular primero el módulo de Young secante E según:

$$E = \frac{L_{DA} \cdot L_s}{S_{DA} \cdot A} \quad (17)$$

Donde L_{DA} corresponde a la máxima carga aplicada, S_{DA} al máximo desplazamiento axial medido, L_s a la altura de la probeta después de la consolidación, y A corresponde al área de la probeta.

Luego, el módulo de corte se calcula según:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (18)$$

Donde μ corresponde al módulo de Poisson.

Para poder caracterizar el comportamiento dinámico del SST se requiere compatibilizar las magnitudes de deformaciones de corte obtenidas mediante RC o TS con las del TX, se requiere utilizar un factor de conversión debido a que las deformaciones de corte obtenidas por el ensayo TX son deformaciones axiales, mientras que las de RC y TC corresponden a distorsiones angulares, para ello se utiliza la siguiente expresión:

$$\gamma_{sa} = \frac{\varepsilon_{sa}}{1 + \mu} \quad (19)$$

Donde ε_{sa} corresponde a la deformación axial de medio ciclo, y γ_{sa} corresponde a la deformación de corte de medio ciclo.

5 Metodología

La metodología se desarrollará para lograr cumplir los objetivos planteados en colaboración con el DICTUC. A partir de lo mencionado en el **primer objetivo específico**, el procedimiento consiste en:

- Medir el índice de refracción del medio líquido (glicerina y agua destilada), a través del uso de un refractómetro móvil PAL BX/RI de la marca ATAGO.
- A partir del índice de refracción del material sólido, en este caso, esferas de vidrio de borosilicato de $RMI \approx 1.47 - 1.49$ (Budwig, 1994) y cuarzo fundido de $RMI \approx 1.4585$ (Ganiyu et al., 2016), se busca igualar los índices de ambas fases, para lo que se agregan gotas de agua al medio líquido seleccionado (glicerina). La proporción de glicerina/agua es de 25:1 inicialmente para el caso de las esferas de vidrio, y varía en función de la cantidad de gotas para alcanzar el RMI objetivo (Díaz & Ibagón, 2019).
- Se elaboran cuatro probetas cilíndricas de 10 [cm] de altura y de 5 [cm] de diámetro utilizando como base la forma de la curva granulométrica del suelo natural, compuesta por esferas de vidrio de borosilicato y de cuarzo fundido, representando una curva análoga en forma, pero con diámetros mayores (diámetros comerciales), es decir, una curva homotética desplazada hacia diámetros mayores, a la cual se le agregará la fase líquida obtenida en el punto anterior.
- Mediante pruebas ópticas de conteo de píxeles se comprueba la transparencia de la probeta elaborada utilizando una imagen de referencia en la base de la probeta, y se ajusta la transparencia variando el RMI del compuesto en caso de ser necesario, según el procedimiento descrito por Bajonero & Ibagón, (2019).

Para el caso del **segundo objetivo específico**, se requiere:

- Elaborar 2 probetas cilíndricas de 50 mm x 100 mm agregando las cantidades de material en peso según los diámetros de las curvas granulométricas homotéticas obtenidas en el primer objetivo específico para ensayos de RC (ASTM D4015-21) y torsión cíclica (TS) (ASTM STP1213, 1994), mientras que para el ensayo triaxial cíclico (TX) (ASTM D3999, 2011) se elaboran 3 probetas cilíndricas de las mismas dimensiones. Ambos ensayos se realizan a presiones de confinamiento de 100 [kPa], en condiciones saturadas, en equipos de laboratorio Controls - Wykeham Farrance.
- Efectuar ensayos mediante los métodos mencionados y chequear consistencia entre las técnicas, así como explorar influencia de la tasa de carga debido a la adición de glicerina con literatura existente (Kong et al., 2018).

El procedimiento para el **tercer objetivo específico** corresponde a:

- Ensayar sobre un contenedor con cierto volumen de material de suelo transparente según los resultados objetivos del **OE1**, incorporando trazadores que serán iluminados mediante un láser y fotografiados durante la deformación del suelo que permitan visualizar directamente el comportamiento del suelo transparente.
- Efectuar cargas cíclicas para observar trayectorias de las partículas trazadoras mediante DIC o PIV, realizar la toma de datos y posteriormente el post-procesamiento de las imágenes a través del software MatchID, midiendo las deformaciones en el medio continuo.

6 Resultados de la investigación

A partir de la metodología planteada en la Sección 5, se presentan los resultados de la investigación por cada objetivo específico logrado.

6.1 Transparencia del SST en base a coincidencia de índices de refracción

Para llevar a cabo la elaboración del SST, se utilizaron dos materiales para constituir la fase sólida, estos corresponden a esferas de vidrio de borosilicato, y a cuarzo fundido. En base a la teoría, se buscó igualar el índice de refracción de la fase sólida de las esferas de vidrio de borosilicato, de $RI = 1.47$ y de 1.4585 para el cuarzo fundido, con el de la fase líquida. Utilizando el refractómetro se midió el índice de refracción del agua destilada a una temperatura de $15.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ obteniendo un $RI = 1.334$, mientras que para la glicerina pura se obtuvo un valor de 1.4745 , como se observa en la Figura 6-1.



Figura 6-1. Índices de refracción de glicerina pura (izquierda) y de agua destilada (derecha).

Para realizar la mezcla adecuada considerando las esferas de vidrio de borosilicato se agregaron gotas de agua destilada a la glicerina pura mediante el uso de un gotario, en la Figura 6-2 se observa la transparencia lograda utilizando un volumen de 100 [ml] de glicerina, y considerando además diferentes proporciones de agua destilada. En la Tabla 6-1 se detallan las proporciones consideradas para cada caso. Como se observa en la Figura 6-3 la mejor transparencia se logra a través de la proporción $100:4$, obtenida en el caso a) según la prueba de conteo de píxeles.

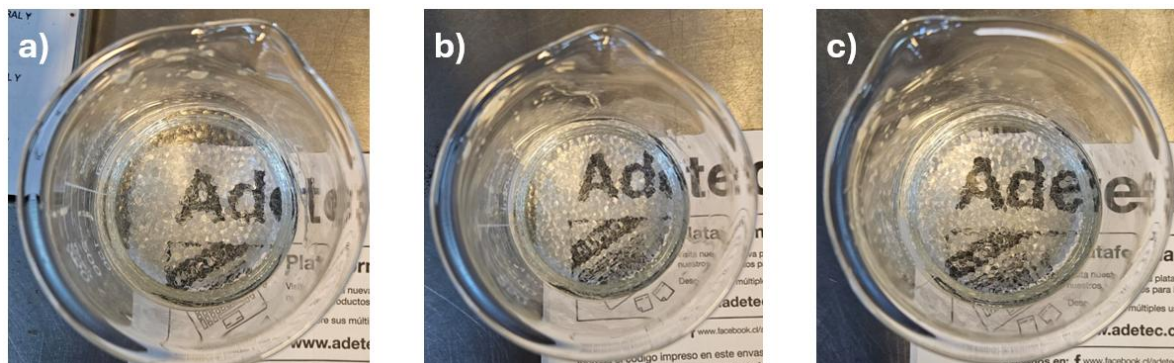


Figura 6-2. Pruebas de transparencia con diferentes soluciones de glicerina 100 [ml] y agua destilada. Caso a) 4 [ml] de agua. Caso b) 1 [ml] de agua. Caso c) 0.5 [ml] de agua.

Tabla 6-1. Combinaciones utilizadas en la fase líquida del suelo transparente con esferas de vidrio de borosilicato.

	Proporción Glicerina – Agua	Índice de refracción <i>RI</i>
Mezcla a)	100:4	1.4691
Mezcla b)	100:1	1.4706
Mezcla c)	100:0.5	1.4741

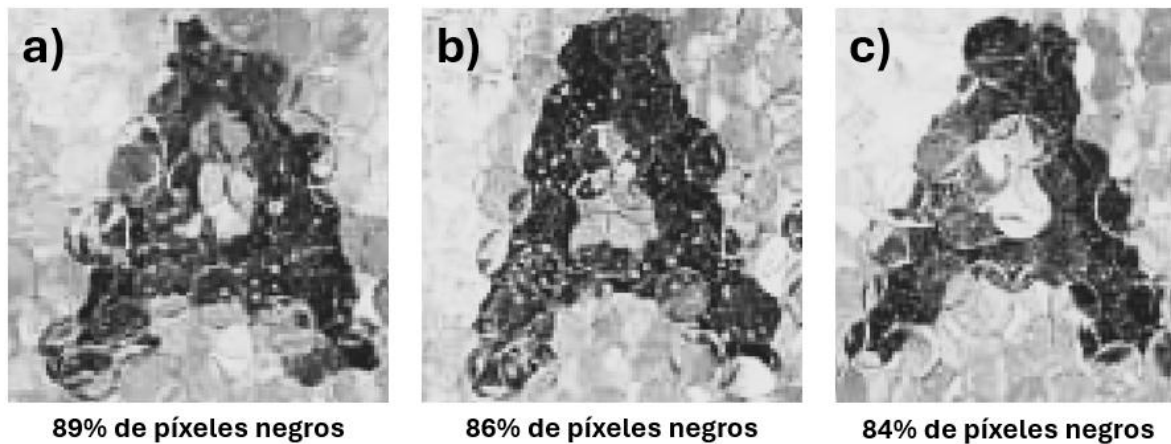


Figura 6-3. Cantidad de píxeles negros en cada prueba de transparencia, utilizando *software* QGIS.

En base a las pruebas ópticas, y al valor más cercano al índice de refracción teórico del vidrio de borosilicato, se optó por adoptar la configuración de la mezcla a) para la caracterización de las propiedades geotécnicas dinámicas.

Una vez determinada la composición para la fase sólida y líquida del SST en base a esferas de vidrio de borosilicato, se realizó un procedimiento análogo con el cuarzo fundido, es decir, se realizaron distintas composiciones de glicerina – agua para determinar la transparencia óptima en la fase líquida, en la Tabla 6-2 se presentan las combinaciones realizadas a una temperatura ambiente de 19.4 [°C]. En base a las pruebas ópticas y al índice de refracción alcanzado, se seleccionó la mezcla d) como la más idónea para realizar la caracterización dinámica, en los anexos del documento se presentan las pruebas ópticas realizadas.

Tabla 6-2. Combinaciones utilizadas en la fase líquida del SST con cuarzo fundido.

	Proporción Glicerina – Agua	Índice de refracción <i>RI</i>
Mezcla a)	50:2	1.4686
Mezcla b)	50:4	1.4636
Mezcla c)	50:6	1.4606
Mezcla d)	50:7	1.4561

Al agregar el sólido a la fase líquida se observa que los vacíos en la muestra se llenan con las burbujas de aire que quedan atrapadas, lo que atenúa la transparencia del suelo, para evitar este inconveniente es

necesario desairear la probeta utilizando técnicas como un aumento de temperatura suave mediante baño María, o una bomba de vacío, que permita extraer dichas burbujas para que los vacíos sean llenados con la fase líquida determinada previamente. En el caso de la investigación realizada, se utilizó una bomba de vacío para la extracción del aire en un rango de tiempo de 20 minutos aproximadamente, y la mezcla que compone la fase líquida se mantuvo a una temperatura de 50 [°C] previo a la elaboración de la probeta utilizando un baño María. En la Figura 6-4 se observa la muestra de suelo transparente en base a cuarzo fundido, en condición previa a la aplicación de vacío y post vacío.

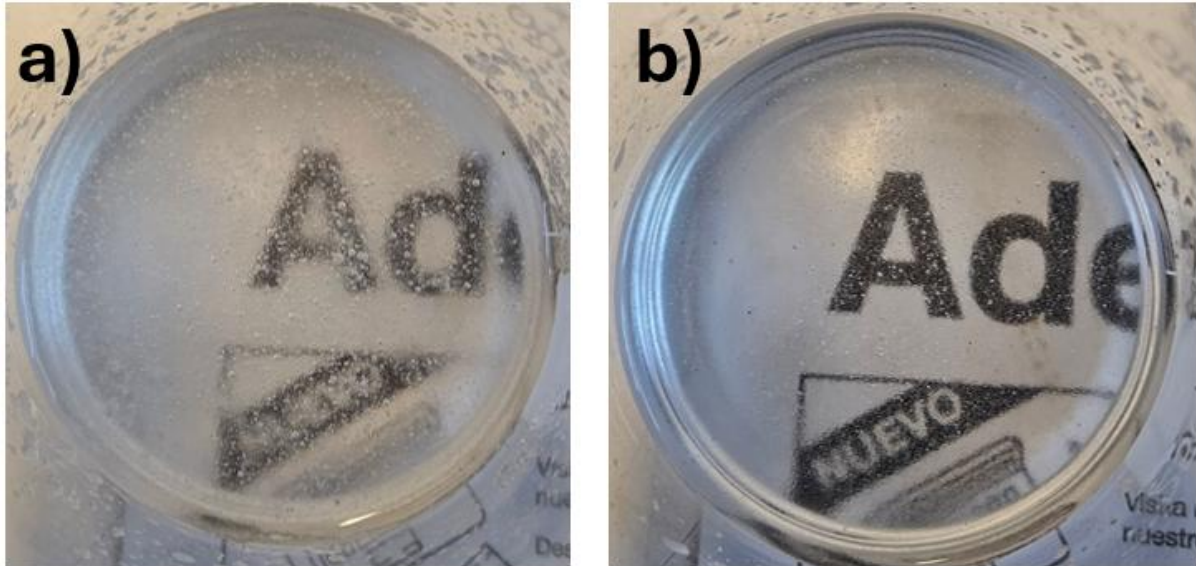


Figura 6-4. Probeta de suelo transparente en base a cuarzo fundido en condición de pre y post vacío.

6.2 Curvas granulométricas homotéticas

Para llevar a cabo la comparación con la arena natural, se requiere construir una curva granulométrica homotética a la curva original, esto debido a que la fase sólida empleada en la elaboración del SST está disponible en diámetros comerciales que no corresponden exactamente a los diámetros representativos (D_{60} , D_{30} , D_{10} u otros) de la arena natural. Para construir dicha curva granulométrica homotética se debe aplicar un factor k a la curva original, este factor proviene se obtiene de la ecuación (5).

En la Tabla 6-3 se presentan los diámetros comerciales considerados para calcular el factor de escala k , tanto para las esferas de vidrio de borosilicato como para el cuarzo fundido. Con los k_i obtenidos, se calcula la media geométrica en base a la ecuación (6), donde n corresponde a 4 para el caso de las esferas de vidrio, y a 5 para el caso del cuarzo fundido. En la Tabla 6-4 se presentan los factores de escala medios obtenidos para cada material con su respectivo error cuadrático medio.

Tabla 6-3. Diámetros comerciales considerados para el SST.

	Esferas de vidrio de borosilicato	Cuarzo fundido
D_{c10} [mm]	1	0.15
D_{c30} [mm]	1.75	0.35
D_{c45} [mm]	-	0.75
D_{c60} [mm]	2.5	2
D_{c90} [mm]	3.50	4

Tabla 6-4. $\bar{k}$ para los materiales de la fase sólida.

	Esferas de vidrio	Cuarzo fundido
$\bar{k}$	3.62	1.47
RMSE	9%	22%

Al aplicar este factor de escala k a los diámetros de los tamices utilizados en la curva granulométrica de la arena natural se obtienen las curvas granulométricas homotéticas. En la Figura 6-5 se muestran las curvas granulométricas homotéticas en comparación a la curva de la arena natural.

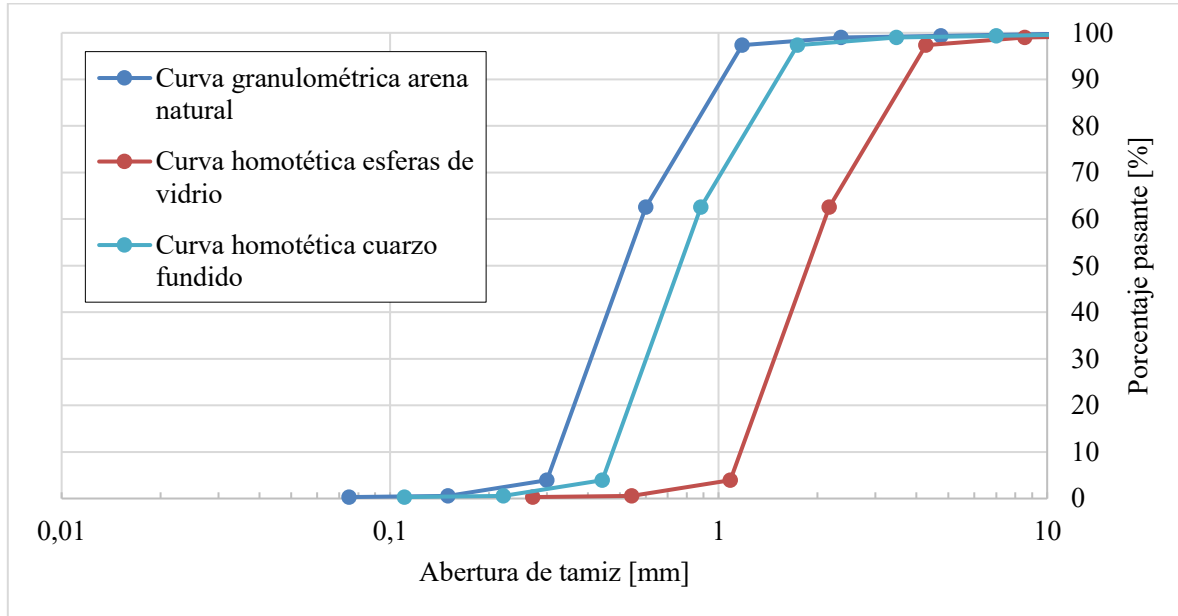


Figura 6-5. Curvas granulométricas original y homotéticas.

Es importante mencionar que se debe verificar que los diámetros comerciales utilizados para la confección de las probetas cumplan con el diámetro máximo en base a las recomendaciones establecidas en la normativa ASTM D3999 para el ensayo triaxial cíclico, y ASTM D4015 para la columna resonante y torsión cíclica. En la Tabla 6-5 se muestra la relación de aspecto considerada en los ensayos dinámicos considerados.

Tabla 6-5. Diámetros máximos de partículas considerados en TX y RC/TS.

Ensayo	Restricción de diámetro adoptada	$D_{m\acute{a}x}$ esferas de borosilicato utilizado [mm]	$D_{m\acute{a}x}$ de cuarzo fundido utilizado [mm]
Triaxial cíclico	$D_{m\acute{a}x} = \frac{D_{probeta}}{6}$	-	4
Columna Resonante/Torsión Cíclica	$D_{m\acute{a}x} = \frac{D_{probeta}}{6}$	3.5	4

Considerando que las probetas elaboradas para los ensayos dinámicos poseen un diámetro de 50 [mm], los diámetros comerciales máximos utilizados se encuentran bajo el límite máximo ($D_{m\acute{a}x} = 8.33$ [mm]), por lo que no se producen efectos no deseados por las condiciones de borde, como concentraciones de esfuerzos en la membrana, o deslizamientos imperfectos que puedan distorsionar las deformaciones o desplazamientos medidos y las probetas elaboradas se consideran representativas del material de estudio.

6.3 Caracterización dinámica del SST

En base a la configuración adoptada en la sección 6.1, se caracteriza dinámicamente el comportamiento del SST en base a los ensayos cíclicos dinámicos mencionados en el objetivo específico N°2, primero se realizó el ensayo de columna resonante en una probeta de 10 [cm] de alto y de 5 [cm] de diámetro constituida por SST en base a esferas de vidrio de borosilicato y la mezcla de agua – glicerina determinada en la sección 6.1. Se adoptó una densidad relativa de alrededor de un 85%, en una condición saturada y a una presión de confinamiento $\sigma'_3 = 100 [kPa]$. En la Figura 6-6 se observa la probeta elaborada montada en el equipo de columna resonante.



Figura 6-6. Probeta de SST en base a esferas de vidrio de borosilicato.

Para poder observar los desplazamientos en la probeta se añadieron trazadores que permiten identificar las trayectorias de las partículas al aplicar la torsión. Para realizar el ensayo se aplicaron diferentes amplitudes en el actuador superior de la columna resonante que comprenden un rango de 0.01 a 4 [V]. En la Figura 6-7 se observa el gráfico de degradación de la rigidez obtenido. Posteriormente se realizó el ensayo de torsión cíclica en el mismo equipo, el cual consiste en aplicar amplitudes de 0.1 a 10 [V] en el actuador de la probeta, considerando un número de 20 ciclos en una duración de 20 [s], equivalente a realizar el ensayo a una frecuencia de 1 [Hz], en la Figura 6-8 se observa el gráfico de amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ obtenido.

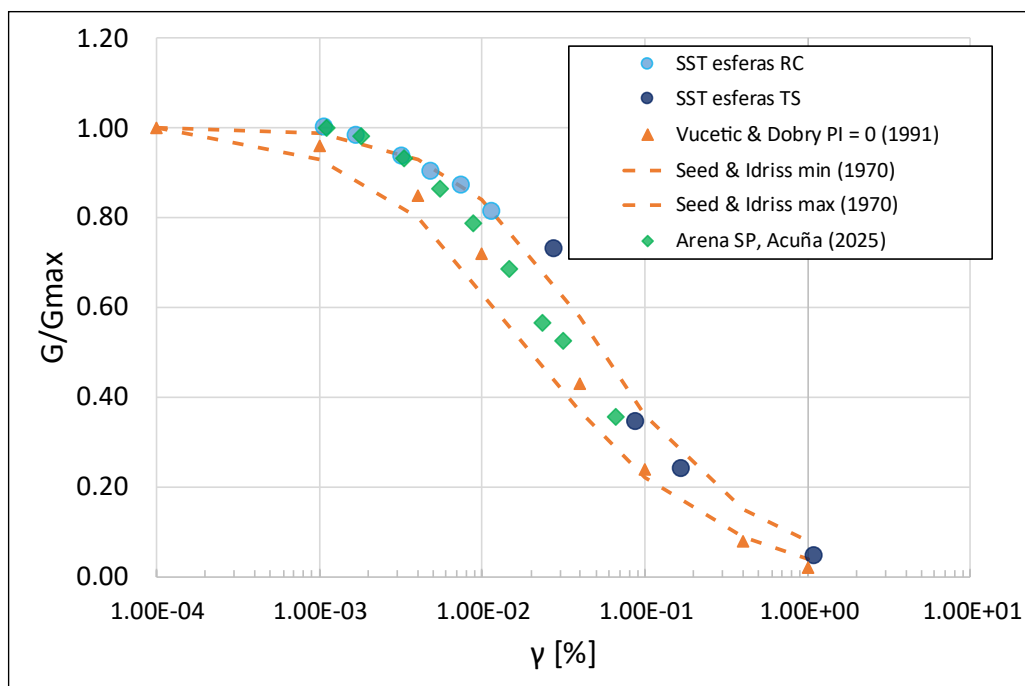


Figura 6-7. Gráfico de degradación de rigidez en función de la deformación de corte γ .

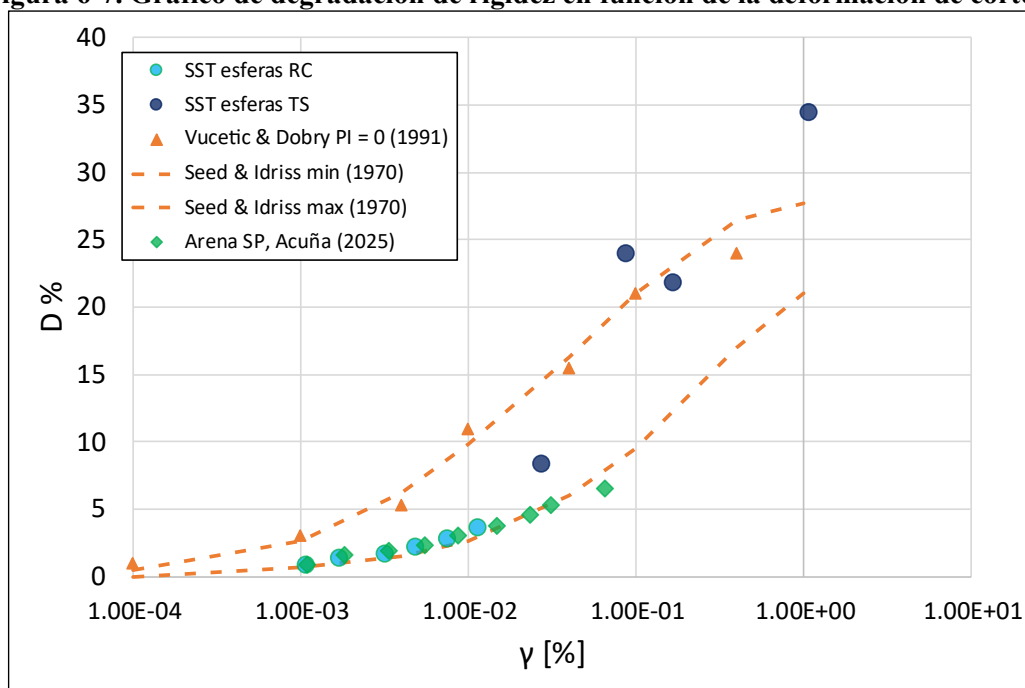


Figura 6-8. Gráfico de evolución del amortiguamiento D [%] en función de la deformación de corte γ .

En la Tabla 6-6 se observan los principales parámetros obtenidos de ambos ensayos, donde RC corresponde al ensayo de columna resonante y TS corresponde al ensayo de torsión cíclica.

Tabla 6-6. Parámetros dinámicos obtenidos con columna resonante y torsión cíclica para esferas de vidrio de borosilicato con un confinamiento de 100 [kPa].

	Esferas RC	Esferas TS	Arena natural RC	Arena Natural TS	Error comparativo RC	Error comparativo TS
V_s [m/s]	272.7	263	243.1	225.6	12%	17%
G_{max} [MPa]	128.68	119.69	119.77	97.02	7.4%	23.4%

Posteriormente se realizó un procedimiento análogo con el cuarzo fundido, consideraron un ensayo de RC, TS y dos (2) triaxiales cíclicos a una densidad relativa de un 90%, confinamiento de 100 [kPa], en probetas saturadas (ver Figura 6-9). Los ensayos triaxiales cíclicos se realizaron bajo una deformación controlada axial $\varepsilon_{sa1} = 1.4 \cdot 10^{-3}$ y $\varepsilon_{sa2} = 5 \cdot 10^{-3}$, para complementar las deformaciones de corte γ analizadas en RC y TS. En la Figura 6-10 y en la Figura 6-11 se observan los gráficos obtenidos de degradación de rigidez y de amortiguamiento en función de la deformación de corte γ . Por último, en la Figura 6-12 se observan el gráfico de módulo de corte G en función de la deformación de corte sin normalizar por $G_{m\acute{a}x}$.



Figura 6-9. Probeta de cuarzo fundido en equipo de RC y TS.

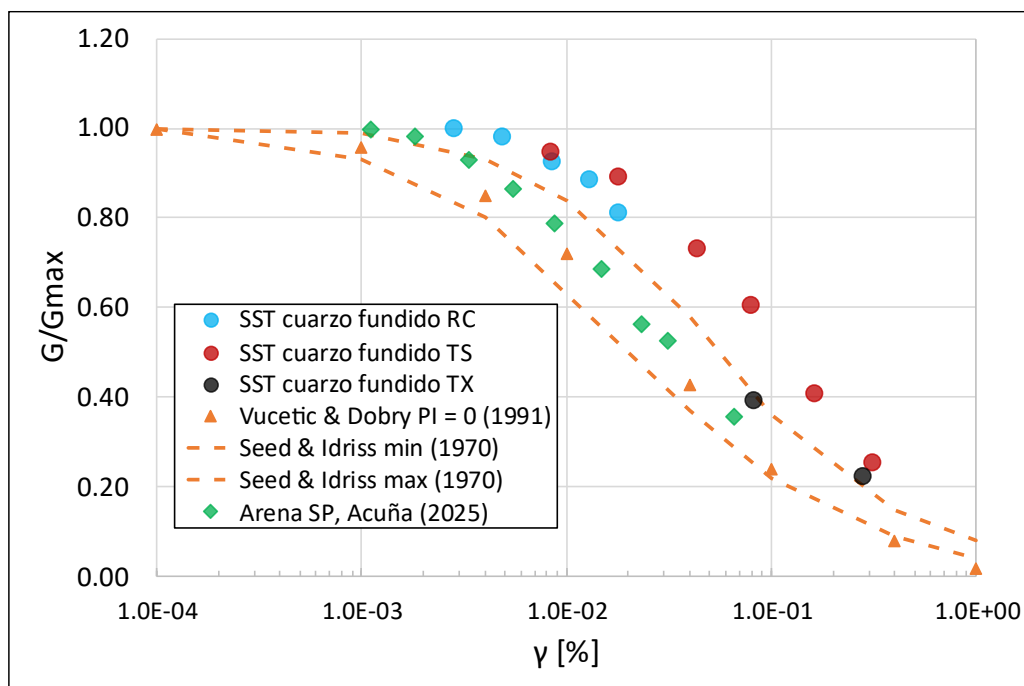


Figura 6-10. Gráfico de degradación de rigidez en función de la deformación de corte γ para cuarzo fundido.

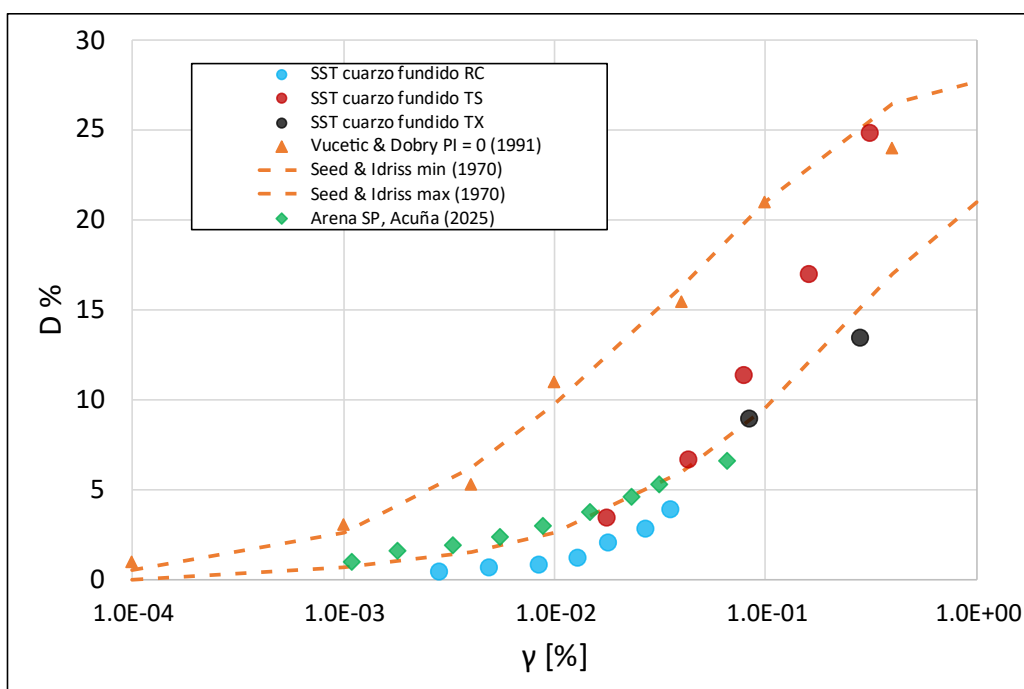


Figura 6-11. Gráfico de evolución del amortiguamiento D [%] en función de la deformación de corte γ para cuarzo fundido.

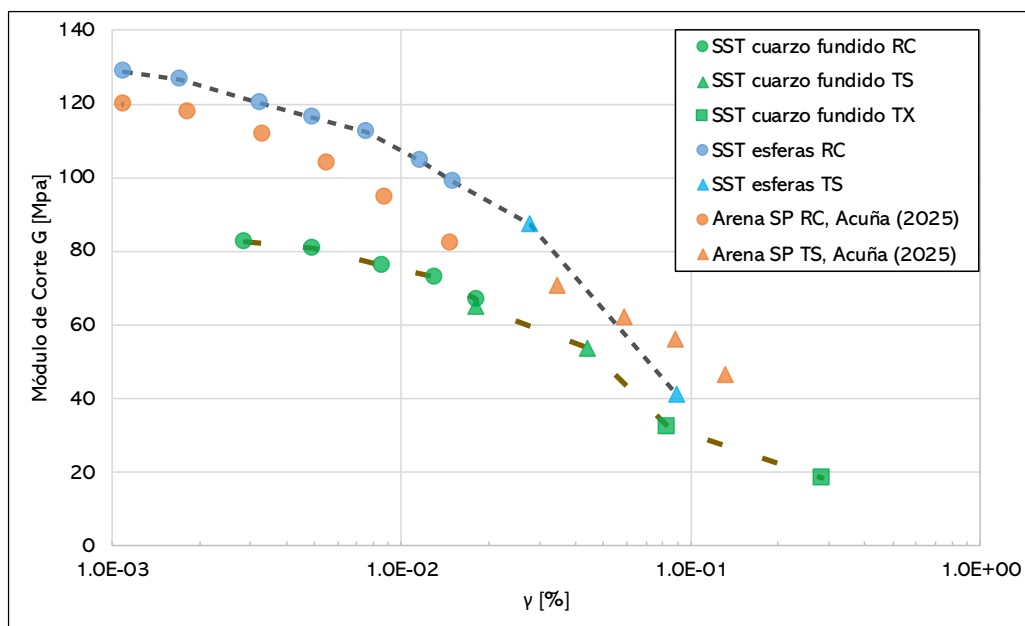


Figura 6-12. Gráfico de degradación de rigidez sin normalizar por $G_{máx}$.

Por último, en la Tabla 6-7 se presentan los valores obtenidos para la velocidad de corte en base a los ensayos de RC y TS para el cuarzo fundido.

Tabla 6-7. Parámetros dinámicos obtenidos con columna resonante y torsión cíclica para cuarzo fundido con un confinamiento de 100 [kPa].

	Cuarzo RC	Cuarzo TS	Arena natural RC	Arena Natural TS	Error comparativo RC	Error comparativo TS
V_s [m/s]	220.10	207.40	243.10	225.60	9.5%	8.1%
G_{max} [MPa]	82.45	73.21	119.77	97.05	31.1%	24.6%

6.4 Uso de correlación digital de imágenes para obtención de desplazamientos y deformaciones

Para poder observar deformaciones mediante DIC, se realizaron dos ensayos triaxiales cíclicos drenados, el primero de ellos a deformación constante de $\varepsilon_{sa} = 5$ [mm], lo que entrega una amplitud de deformación teórica de movimiento total $\varepsilon_{da} = 10$ [mm], mientras que el segundo se realizó a una deformación constante de $\varepsilon_{sa} = 0.5$ [mm] en probetas saturadas, a un confinamiento de 100 [kPa] y a una densidad relativa de $DR = 90\%$. A través del software MatchID Grabber se realizó la toma de datos con una tasa de frecuencia de 2 [Hz], considerando que la frecuencia a la que se realiza el ensayo es de 0.1 [Hz], por lo que en un ciclo se obtienen 20 fotografías, y el procesamiento de las imágenes se realizó a través del software MatchID 2D. En la Figura 6-13 se presentan imágenes sin procesar de la primera probeta, donde se observan las concentraciones de esfuerzo en ciertas zonas de la probeta (más blancas). Evidenciando un ensanchamiento en la parte central de la probeta al momento de comprimirse, y un “cuello de botella”, al momento de traccionarse.

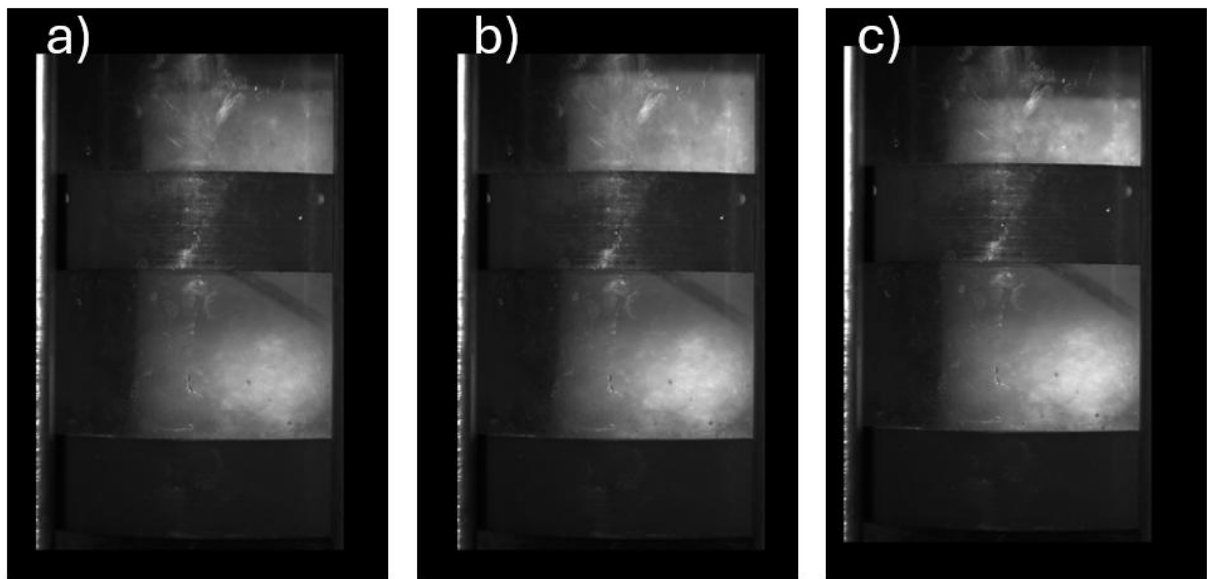


Figura 6-13. Probeta ensayada en imágenes sin procesar. a) Probeta en estado estático. b) Probeta traccionada. c) Probeta comprimida.

Por otra parte, en la Figura 6-14 y en la Figura 6-15 se observan los campos de deformaciones verticales en la segunda probeta obtenidos a través del procesamiento de imágenes utilizando MatchID 2D. En la Figura 6-16 se presenta la deformación vertical en un punto ubicado en el sector central de la probeta a medida que se capturan las imágenes a través del software MatchID 2D, y también mediante el transductor de desplazamiento ubicado en el actuador superior del triaxial cíclico. En la sección 6.5 se analizarán en profundidad estos resultados.

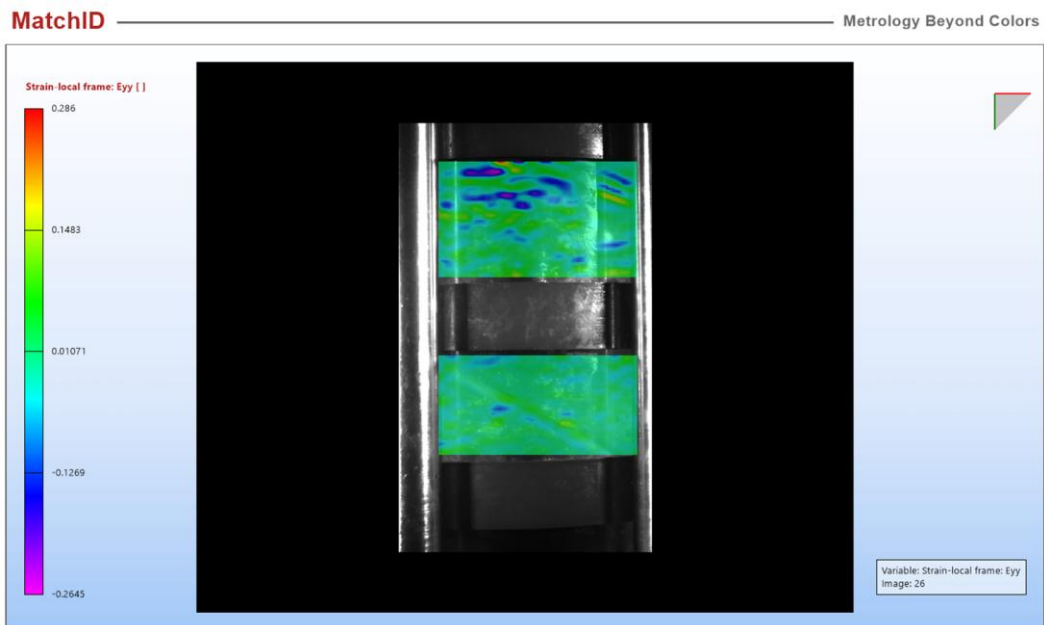


Figura 6-14. Deformaciones verticales ϵ_{yy} en probeta comprimida.

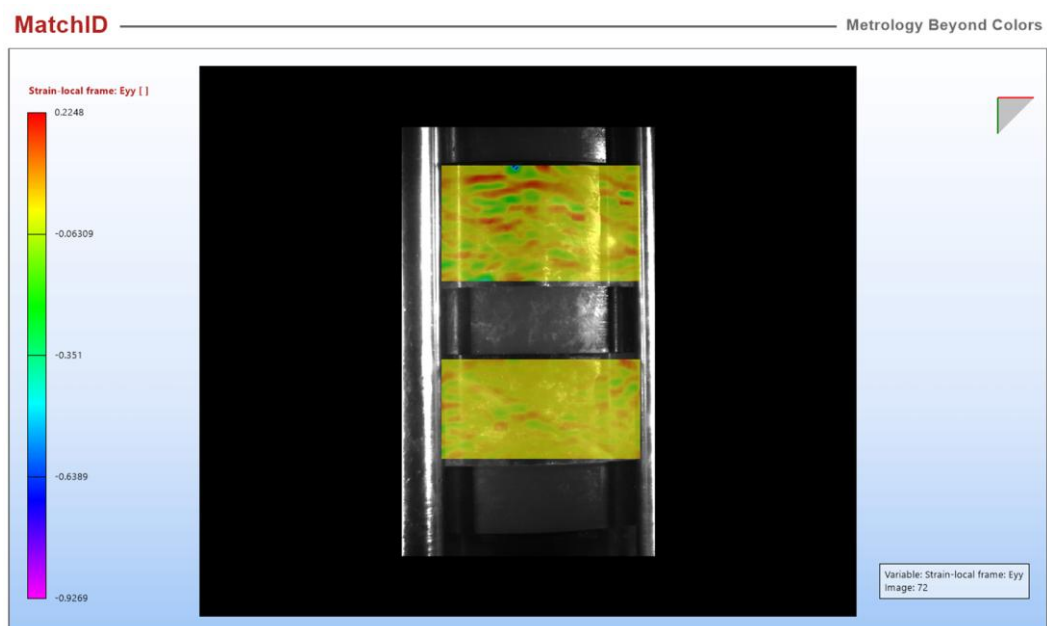


Figura 6-15. Deformaciones verticales ϵ_{yy} en probeta traccionada.

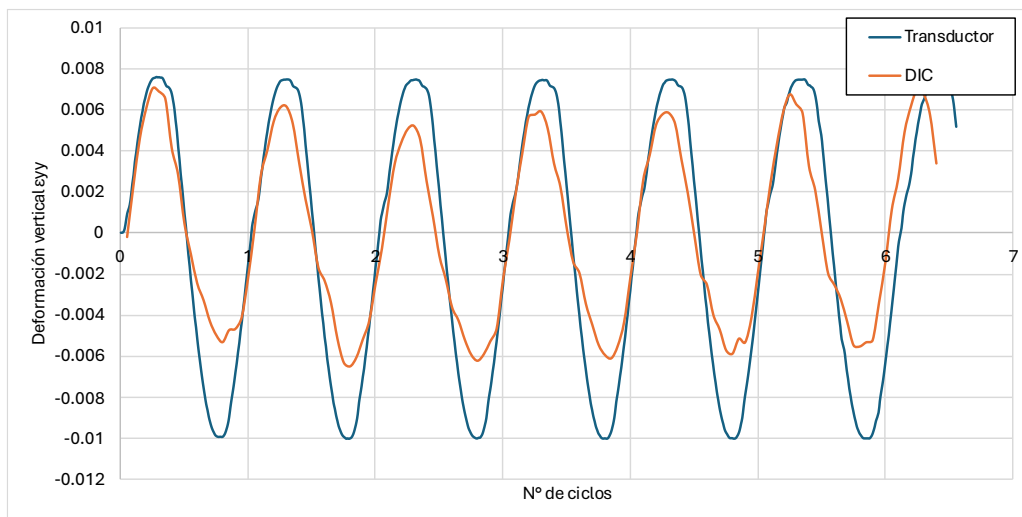


Figura 6-16. Deformación vertical ϵ_{yy} de MatchID y de transductor de desplazamiento en función del número de ciclos.

6.5 Análisis de resultados

6.5.1 Transparencia del SST

A partir de los resultados obtenidos al realizar la coincidencia de índices de refracción o RMI, se observa que se logra la transparencia requerida en el SST, a través del uso de esferas de vidrio de borosilicato en combinación con la mezcla glicerina – agua, pero se logra una mejor transparencia en base a cuarzo fundido como fase sólida y mezcla glicerina – agua como fase líquida.

En la Figura 6-2 se presentaron las distintas configuraciones estudiadas de la mezcla de SST compuesta por esferas de vidrio de borosilicato y la mezcla glicerina – agua, se observa que todas cumplen con un nivel de transparencia adecuado, pero la esfericidad de las partículas distorsiona la luz que incide en el recipiente, lo cual afecta la claridad de la imagen de prueba utilizada. En base a la Tabla 6-1, se observa que las combinaciones denominadas como a) y b) son aquellas que más se acercan al índice de refracción teórico, para comprobar la transparencia se ejecuta un conteo de píxeles negros con el software QGIS (ver Figura 6-3), del conteo de píxeles se desprende que aquel que posee la mayor cantidad de píxeles negros es el caso a), configuración que se adopta para la configuración dinámica.

De la Figura 6-4 se observa que la transparencia aumenta considerablemente al aplicar vacío en la mezcla de cuarzo fundido con mezcla de glicerina – agua, esto debido a que las burbujas de aire salen de los poros de la solución, resulta necesario entonces verificar los demás factores que inciden en la transparencia, entre ellos la temperatura (que cambia el índice de refracción de la fase líquida) y el índice de vacíos de la probeta, que puede disminuirse a través de un aumento en la densidad relativa con la que se construya la probeta.

6.5.2 Curvas granulométricas homotéticas

En la Figura 6-5 se presentan las curvas granulométricas homotéticas de SST en comparación a la curva granulométrica original, se observa que ambas curvas están desplazadas a la derecha de la curva original, esto quiere decir que los diámetros comerciales que se utilizan para representar los diámetros característicos, como el D_{30} , o D_{60} , son mayores que los de la curva granulométrica de la arena natural, ahora bien, comparando las curvas homotéticas se desprende que las partículas de cuarzo fundido tienen diámetros más cercanos a los de la arena natural. Esto puede comprobarse con el coeficiente k obtenido, ($k = 1.47$ para cuarzo fundido, $k = 3.62$ para esferas de vidrio), lo que implica que existe una menor amplificación a los diámetros característicos de la arena natural para lograr su representación con el cuarzo fundido, en comparación a las esferas de vidrio. Ahora bien, en la Tabla 6-4 se observa que el RMSE obtenido para las esferas de vidrio de borosilicato es más bajo que el obtenido para el cuarzo fundido, esto se explica por la menor dispersión del rango de diámetros comerciales disponibles para la

representación del material utilizando las esferas, que utilizando cuarzo fundido. Al analizar los coeficientes de curvatura y de uniformidad, se obtienen exactamente los mismos coeficientes para la arena natural, las esferas de vidrio de borosilicato y el cuarzo fundido, con $C_u = 1.77$ y $C_c = 0.97$.

6.5.3 Caracterización dinámica del SST

Al observar los resultados obtenidos en esferas de vidrio de borosilicato de los ensayos de columna resonante y torsión cíclica de la Figura 6-7, se observa que la curva de degradación de rigidez tiene una forma coincidente con los resultados de la literatura para arenas limpias (sin contenido de finos), encontrándose dentro de los rangos definidos por Vucetic & Dobry (1991) y por Seed et al., (1970). Además, al comparar con la arena natural se observa un comportamiento un poco más rígido en las esferas a pequeñas deformaciones, incluso bordeando el límite máximo para arenas obtenido por Seed & Idriss (1986), mientras que la arena natural se mantiene dentro del rango esperado, cuando las deformaciones superan $\gamma > 0.01\%$, el comportamiento se vuelve similar en forma y en amplitud. Además, en la Figura 6-8 se observa que presentan un comportamiento similar en cuanto a la evolución del amortiguamiento, ya sea para deformaciones pequeñas ($\gamma \approx 0.001\%$), como para deformaciones mayores ($\gamma \approx 0.1\%$).

Al realizar los ensayos sobre la probeta de cuarzo fundido, de la Figura 6-10 se desprende que el cuarzo fundido tiene un comportamiento similar a las esferas de vidrio de borosilicato, alcanzando incluso una degradación de rigidez menor que la de las esferas a pequeñas deformaciones, pero a grandes deformaciones la degradación es mayor que en la arena natural y que en las esferas, de todas maneras, los valores obtenidos superan los límites establecidos por Seed & Idriss (1970). En cuanto a los amortiguamientos, las esferas de vidrio de borosilicato presentan un comportamiento prácticamente idéntico hasta deformaciones de $\gamma \approx 5 \times 10^{-2}$ (ver Figura 6-8), mientras que, analizando el comportamiento del cuarzo fundido, se puede observar en la Figura 6-11 que el material de cuarzo fundido posee menor amortiguamiento que la arena natural, hasta deformaciones aproximadas de $\gamma \approx 1 \times 10^{-1}$,

Por último, al analizar los resultados obtenidos de velocidad de la onda de corte V_s y la rigidez máxima G_{max} del SST en base a esferas de vidrio de borosilicato frente a la arena natural (Tabla 6-6), se observa que la velocidad de la onda de corte resulta levemente mayor (12% en RC y 17% en TS), y como la rigidez se relaciona con la velocidad de corte V_s a través de la ecuación (9), dependiendo de la densidad de la probeta, ambos parámetros pueden presentar variaciones, por lo que es esperable que si se tiene el material, ya sea la arena natural, como el SST de esferas en condiciones de menor confinamiento o menor densidad relativa, la velocidad de corte y la rigidez disminuyan también.

En el caso del cuarzo fundido, se observan resultados un poco más cercanos a los valores de la arena natural en cuanto a velocidad de onda de corte, obteniendo velocidades mayores con errores comparativos de alrededor de 9% en RC y 8% en TS, mientras que en el caso del módulo de corte máximo $G_{máx}$, se obtienen errores comparativos mayores que en el caso del SST de esferas, alcanzando valores del orden de 30% en RC y del 25% en TS.

6.5.4 Análisis de desplazamientos y deformaciones con DIC

Al analizar los resultados obtenidos a través del uso de DIC para capturar las deformaciones de la probeta en el ensayo triaxial cíclico, en la Figura 6-13 se observa que se tiene una concentración de esfuerzos a lo largo de la probeta al momento de comprimirla, al igual que durante la tracción, esto puede explicarse debido a que al aumentar la carga axial la probeta tiende a reordenar sus partículas, y al tratarse de un ensayo drenado, los esfuerzos se transmiten principalmente a la componente sólida del SST, ya que la componente líquida tiene la capacidad de ser drenada, evitando así la generación de la presión de poros.

En segundo lugar, al observar la Figura 6-14 y la Figura 6-15, se presentan deformaciones ε_{yy} concordantes con lo esperado en base a la deformación axial aplicada en el ensayo. Al comprimirse la probeta, se encuentran principalmente deformaciones negativas en el eje vertical, alcanzando valores medios de $\varepsilon_{yy} = -0.0107$, lo que al multiplicar por el largo total de la probeta (100 [mm]), puede entenderse como un desplazamiento en el eje vertical de $\Delta_y = 1.07$ [mm]. En el caso de traccionar la

probeta, se alcanzan valores medios de $\varepsilon_{yy} = 0.07$, equivalente a un desplazamiento vertical $\Delta_y = 0.7 [mm]$.

Por último, en la Figura 6-16 se presenta un gráfico de deformación vertical en un punto ubicado en el sector central de la probeta, se puede apreciar que las deformaciones tienen un comportamiento cíclico en base a los ciclos de carga y descarga del ensayo, y que los valores de deformación se encuentran dentro del rango máximo y mínimo definidos por el software para deformaciones verticales de tracción y de compresión. Adicionalmente se observa una inclinación hacia el eje vertical negativo en la medición realizada con DIC, lo cual tiene una explicación en base a que se asume un comportamiento lineal del suelo en un rango de deformaciones de corte $\gamma \approx 10^{-2}\%$ (ASTM D4015-21), y como la deformación axial utilizada puede convertirse a deformación de corte en base a la ecuación (19), se obtiene que la deformación de corte equivalente aplicada es de $\gamma = 6 \cdot 10^{-1}\%$, superando el rango lineal elástico, lo que se traduce en deformaciones remanentes en la probeta, observables como la pendiente del gráfico analizado. Al comparar la deformación vertical obtenida mediante el análisis de correlación digital de imágenes con la medición obtenida con el transductor de desplazamiento ubicado en el actuador superior del equipo de triaxial cíclico, se observa que las amplitudes de deformaciones verticales para tracción y para compresión son bastante similares, obteniéndose valores un poco menores de deformación mediante la medición de correlación digital de imágenes, cercanos a $\varepsilon_{yy} = 0.006$ en comparación a la deformación vertical de $\varepsilon_{yy} = 0.009$ que se obtiene con el transductor de desplazamiento en promedio para tracción como para compresión de la probeta, adicionalmente se observa que no se presenta la pendiente que se observa mediante la correlación digital de imágenes, esto puede explicarse porque la medición de correlación digital de imágenes se realiza en las partículas que componen la probeta, mientras que la medición del transductor, al realizarse en el actuador no necesariamente captura el comportamiento de las partículas dentro de la probeta, sino más bien del pistón superior.

7 Conclusiones

La modelación física puede ser utilizada y complementada con técnicas de visualización directa en tiempo real para verificar el comportamiento en deformación o campos de desplazamientos generados a partir de cargas dinámicas o cíclicas en una masa de suelo, la elaboración del SST persigue el objetivo de permitir estudiar fenómenos complejos mediante DIC o PIV representando dicha masa de suelo con un material equivalente e idóneo en cuanto a propiedades dinámicas, en comparación con un suelo natural. En base a la investigación realizada, se obtuvieron los siguientes hallazgos principales:

- El material de suelo sintético transparente cumple con la transparencia y la homogeneidad requerida para modelamiento físico, utilizable en investigaciones geotécnicas o estructurales a futuro. En base a pruebas de conteo de píxeles y visualización directa, se obtienen proporciones adecuadas de las componentes líquidas y sólidas del material elaborado.
- El estudio demuestra que las propiedades geotécnicas dinámicas del material, y su comportamiento en función de la deformación de corte es similar al de la arena natural en forma y en amplitud, incluso se obtienen valores de módulo de rigidez G y de amortiguamiento histerético D presentando errores comparativos relativamente bajos ($<10\%$).
- A través de correlación digital de imágenes aplicadas a modelos con SST se comprueba que las trayectorias de los campos de deformaciones y desplazamientos representan el comportamiento esperado para el material mediante los ensayos de laboratorio normalizados realizados, esto significa un aporte práctico a la elaboración de modelos físicos en geotecnia, y en estructuras, ya que permite estudiar diferentes configuraciones de estructuras fundadas sobre fundaciones superficiales o profundas, y evaluar fenómenos complejos, como flujos de agua a través del suelo, interacción dinámica suelo – estructura, técnicas de mejoramiento de suelos, entre otros.

- Los ensayos de laboratorio realizados demostraron continuidad en las curvas de comportamiento del material, lo que permite explorar deformaciones de corte de distintos ordenes de magnitud aplicables sobre el SST.

La investigación realizada presentó ciertas limitaciones que es posible proyectar a futuro como nuevas investigaciones, que solidifiquen el trabajo realizado y evalúen posibles soluciones a las fronteras presentadas:

- La esfericidad de las partículas de vidrio de borosilicato afecta directamente sobre la transparencia, disminuyéndola drásticamente, lo que es posible mejorar al aumentar la angularidad de las partículas.
- Las partículas angulares de mayor diámetro muestran una mejor transparencia, ya que, si bien permiten un mayor volumen de vacíos en la mezcla de suelo sintético, las burbujas de aire pueden ser extraídas con facilidad a través de gotarios, bombas de vacío y baño maría (o la combinación de las anteriores), ahora bien, al tratar de representar la arena natural, no se utilizaron solamente partículas de grandes diámetros, por lo que resulta complejo extraer la totalidad de las burbujas de aire de la mezcla que compone al SST.
- El comportamiento estudiado se realiza a confinamientos de 100 [kPa], sin embargo, la arena en estado natural puede tener confinamientos distintos en base al grado de consolidación y cargas que experimente, se propone explorar el comportamiento a confinamientos mayores y menores al utilizado.

8 Referencias

- Ahmed, M., Iskander, M., & Asce, F. (2011). *Transparent Soil Model Tests and FE Analyses on Tunneling Induced Ground Settlement*.
- ASTM D4015. (2021). *Test Methods for Modulus and Damping of Soils by Fixed-Base Resonant Column Devices*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D4015-21>
- Bajonero, A., & Ibagón, L. (2019). Investigación Experimental en Suelos Transparentes. *Universidad de Los Andes*.
- Bashkatov, A. N., & Genina, E. A. (2003). <title>Water refractive index in dependence on temperature and wavelength: a simple approximation</title>. 393–395. <https://doi.org/10.1117/12.518857>
- Bathurst, R. (2011). A Transparent Sand for Geotechnical Laboratory Modeling. *Geotechnical Testing Journal*, 34. <https://doi.org/10.1520/GTJ103808>
- Budwig, R. (1994). Refractive index matching methods for liquid flow investigations. *Experiments in Fluids*, 17, 350–355. <https://doi.org/10.1007/BF01874416>
- Díaz, A., & Ibagón, L. (2019). *Obtención y Construcción de un Suelo Transparente*.
- Ganiyu, A. A., Rashid, A. S. A., & Osman, M. H. (2016). Utilisation of transparent synthetic soil surrogates in geotechnical physical models: A review. In *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* (Vol. 8, Issue 4, pp. 568–576). Chinese Academy of Sciences. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.11.009>
- Guzman, I. L., & Iskander, M. (2013). Geotechnical Properties of Sucrose-Saturated Fused Quartz for Use in Physical Modeling. *Geotechnical Testing Journal*, 36(3), 448–454. <https://doi.org/10.1520/GTJ20120182>
- Huang, T. S., & Tsai, R. Y. (1981). Image Sequence Analysis: Motion Estimation. In T. S. Huang (Ed.), *Image Sequence Analysis* (pp. 1–18). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87037-8_1
- Iai, S. (1989). SIMILITUDE FOR SHAKING TABLE TESTS ON SOIL-STRUCTURE-FLUID MODEL IN lg G RA VITA TION AL FIELD. In *SOILS AND FOUNDATIONS* (Vol. 29, Issue 1).
- Iskander, M., & Liu, J. (2010). Spatial Deformation Measurement Using Transparent Soil. *Geotechnical Testing Journal*, 33(4), 314–321. <https://doi.org/10.1520/GTJ102745>
- Kong, G., Li, H., Yang, G., & Cao, Z. (2018). Investigation on shear modulus and damping ratio of transparent soils with different pore fluids. *Granular Matter*, 20(1). <https://doi.org/10.1007/s10035-017-0779-5>
- Liu, J. Y., & Iskander, M. G. (2010). Modelling capacity of transparent soil. *CANADIAN GEOTECHNICAL JOURNAL*, 47(4), 451–460. <https://doi.org/10.1139/T09-116>
- Miguel M. Rocha. (1957). *The Possibility of Solving Soil Mechanics Problems by the use of Models*. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Moncarz, P. D. (1981). Theory and application of experimental model analysis in earthquake engineering. *Stanford University California*, 50.
- Rechenmacher, A. L., Asce, A. M., Medina-Cetina, Z., & Asce, S. M. (2007). *Calibration of Soil Constitutive Models with Spatially Varying Parameters*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412007133:121567>
- Sadek, S., Iskander, M. G., & Liu, J. (n.d.). *Accuracy of Digital Image Correlation for Measuring Deformations in Transparent Media*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0887-3801200317:288>

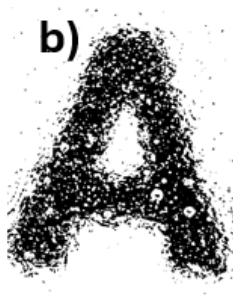
- Seed, B. H., T, W. R., Idriss, I. M., & Tokimatsu, K. (1986). Moduli and Damping Factors for Dynamic Analyses of Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11), 1016–1032. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1986\)112:11\(1016\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1986)112:11(1016))
- Segaline, H., Sáez, E., & Ubilla, J. (2022a). Continuous characterization of dynamic soil behavior by Digital Image Correlation in a transparent shear laminar box. *ACTA GEOTECHNICA*, 17(6), 2395–2414. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01351-1>
- Segaline, H., Sáez, E., & Ubilla, J. (2022b). Evaluation of dynamic soil-structure interaction effects in buildings with underground stories using 1 g physical experimentation in a transparent shear laminar box. *Engineering Structures*, 266. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114645>
- Semblat, J.-F., & Pecker, A. (2009). *Waves and Vibrations in Soils: Earthquakes, Traffic, Shocks, Construction Works*.
- Sun, J., & Liu, J. (2014). Visualization of tunnelling-induced ground movement in transparent sand. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 40, 236–240. <https://doi.org/10.1016/J.TUST.2013.10.009>
- Test Methods for the Determination of the Modulus and Damping Properties of Soils Using the Cyclic Triaxial Apparatus*. (2011). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D3999-11>
- Tong, L. Y., Zhou, H., Sheil, B., Liu, H. L., & Chen, R. L. (2024). Full-field internal 3D deformations measurement of transparent soil using 3D-DIC combined with optical slicing. *ACTA GEOTECHNICA*, 19(3), 1627–1648. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02275-2>
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89–107. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))
- Wood, D. M., Crewe, A., & Taylor, C. (2002). Shaking table testing of geotechnical models. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 2(1), 1–13. <https://doi.org/10.1680/ijpmg.2002.020101>
- Yu, G., Cui, Y., He, L., Li, Y., & Feng, H. (2025). Influence of the soil-structure interface on seepage characteristics in uniformly-grained soils: Microscopical insights from transparent soil experiments. *Soils and Foundations*, 65(2), 101596. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2025.101596>
- Zhang, J., Andrus, R. D., & Juang, C. H. (2005). *Normalized Shear Modulus and Material Damping Ratio Relationships*. <https://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412005131:4453>
- Zhang, L., Liu, H., Ding, X., Chen, R., Zhou, H., Li, Y., & Ren, X. (2024). Development of transparent soil grouting test system and its application in grouted gravel pile. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114899>
- Zhang, W., Gu, X., Zhong, W., Ma, Z., & Ding, X. (2022). Review of transparent soil model testing technique for underground construction: Ground visualization and result digitalization. In *Underground Space (China)* (Vol. 7, Issue 4, pp. 702–723). Tongji University. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2020.05.003>
- Zhang, W., He, X., Xu, Q., Wang, L., Zhu, X., Wang, P., & Sun, W. (2024). Investigation on internal evolution process of slope under seismic loading: insights from a transparent soil test and shaking table test. *Transportation Geotechnics*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101399>
- Zhao, H. (2007). *DEVELOPMENT AND ASSESSMENT OF TRANSPARENT SOIL AND PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY IN DYNAMIC SOIL-STRUCTURE INTERACTION UTC R155*.
- Zhao, H., Ge, L., & Luna, R. (2010). Low Viscosity Pore Fluid to Manufacture Transparent Soil. *Geotechnical Testing Journal*, 33(6), 463–468. <https://doi.org/10.1520/GTJ102607>

Zhong, W., Liu, H., Gu, D., Zhang, W., Yang, C., & Gao, X. (2022). Development of a preparation method of transparent soil-rock mixture for geotechnical laboratory modeling. *Engineering Geology*, 301. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106622>

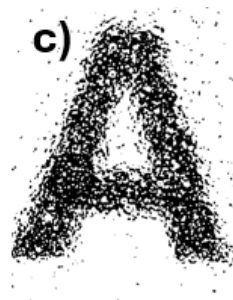
9 Anexos



**49% de píxeles
negros**



**55% de píxeles
negros**



**63% de píxeles
negros**



**95% de píxeles
negros**

**Anexo 1. Cantidad de píxeles negros en cada prueba de transparencia para cuarzo fundido,
utilizando software QGIS.**