XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
15 a 18 de Setembro de 2020 – Campinas - SP

Análisis Experimental de Daño en Arenas Artificialmente Cementadas Mediante Ensayos Triaxiales de Bajos Ciclos de Carga y Descarga

Rubén Alejandro Quiñónez Samaniego
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rquinonez@ing.una.py

Maria Elizabeth Ortellado Bogado
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, eliortelladob@gmail.com

Fabiola Maria Aguilera Ferreira
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, fabimaguilera@gmail.com

Fulgencio Antonio Aquino Duarte
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, aaquino@ing.una.py

Rubén Alcides López Santacruz
Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rlopez@ing.una.py

RESUMEN: El presente trabajo caracteriza de manera experimental el comportamiento del daño en suelos granulares sin refuerzo y suelos granulares mejorados con diferentes porcentajes de cemento, midiendo el daño mediante la variación del Módulo Elástico, con ciclos de Carga, Descarga y Recarga. Los resultados son presentados en curvas de tensión-deformación para el suelo natural y el suelo con adición de cemento en diferentes tenores que abarca el estudio. Subsecuentemente, la obtención del daño fue determinado a partir de los parámetros elásticos y mecánicos.

PALABRAS-CLAVES: Suelo cemento, modulo de elasticidad, cargas cíclicas, mecánica del daño continuo.

ABSTRACT: The present work characterizes, experimentaly, the damage behavior of granular soils without reinforcement and granular soils improved with different percentages of cement, measuring the damage by means of the Young's Modulus variation, with Load, Unload and Reload cycles. The results are specified in stress-strain curves for natural soil and soil with cement additions in different percentages covered by the study. Subsequently, the damage was determined from the elastic and mechanical parameters.

KEYWORDS: Soil-cement, young's modulus, cyclic load, continuum damage mechanics.

1 Introdução

El suelo es sin dudas el material de construcción más antiguo de los empleados por el hombre en su evolución histórica llegando hasta el presente. El desarrollo tecnológico alcanzado en las últimas décadas ha brindado la posibilidad de producir continuamente toda una serie de nuevos materiales que les permiten satisfacer los requerimientos de la construcción, uno de esos materiales que ha logrado tener un amplio uso a partir de la década de los cuarenta es el producto endurecido de la mezcla compactada de suelo con cemento y agua, llamado suelo-cemento, con el cual se adquiere un nuevo material resistente a los esfuerzos de compresión, prácticamente impermeable, termo aislante y estable en el tiempo (Instituto Torroja, 1987; Avitia, 1991)

Analizar o, si es posible, predecir el fallo de las estructuras es uno de los principales objetivos de la ciencia de la ingeniería. En consecuencia, la Mecánica de Fractura se convirtió en una de sus principales ramas, se basó en el análisis de grietas existentes, sin embargo, especialmente en condiciones de carga cíclica, esto podría ser demasiado tarde para prevenir un desastre, por lo tanto, la pregunta sobre el estado precedente, es decir, la evolución del daño interno antes de que las macrogrietas se hicieran visibles fue entonces planteado. Los

investigadores como A. Palmgreen (1924), M.A. Miner (1945) y E.L. Robinson (1952) fueron pioneros en el concepto de una variable relacionada con el deterioro progresivo previo a la falla, pero desde el año 1958 se considera como el punto de partida de la Mecánica del Daño Continuo, cuando L.M. Kachanov publicó el primer artículo sobre una variable de campo "ψ" llamada "continuidad". Unos quince años después, la ecuación D = (1 - ψ) es una variable del estado interno en el sentido termodinámico: $0 \leq D \leq 1$ (el valor de 0 para el estado no dañado y 1 para la falla), es un modelo simple de daño a materiales que posteriormente podría extenderse a materiales frágiles, elásticos, plásticos o viscosos en todas las condiciones de cargas uniaxiales o multiaxiales, simples o cíclicas para que pueda considerarse casi universal. Por muchos años el concepto de "ψ" fue prácticamente ignorado y solo apareció un resultado importante, en 1968, con el concepto de estrés efectivo introducido por Y.N. Rabotnov. Los desarrollos básicos de la Mecánica del Daño ocurrieron durante la década de 1970, al menos diez años después del gran desarrollo de la Mecánica de Fractura. En la década de 1980, la teoría se estableció sobre una base más rigurosa utilizando la termodinámica y la micromecánica, comenzando así las aplicaciones a la Ingeniería. Como es habitual en una ciencia viva, muchas de las preguntas aún siguen abiertas y las limitaciones del modelo necesitan más investigación (Lemaitre, 2005)
Por lo tanto, este trabajo consiste en Evaluar el proceso de daño de arenas artificialmente cementadas mediante la degradación de la rigidez en ensayos triaxiales de bajos ciclos de carga para diferentes dosificaciones y presiones de confinamiento. Al respecto, relacionar el daño con otros parámetros del geo-material como resistencia, deformaciones, densidad o cantidad de cemento.

2. Programa Experimental

2.1 Materiales

2.1.1 Arena

La arena empleada para esta investigación fue extraída de una cantera ubicada en el barrio Viñas Cué de la ciudad de Asunción (ver Figura 1), ubicada en el margen izquierdo del Rio Paraguay.

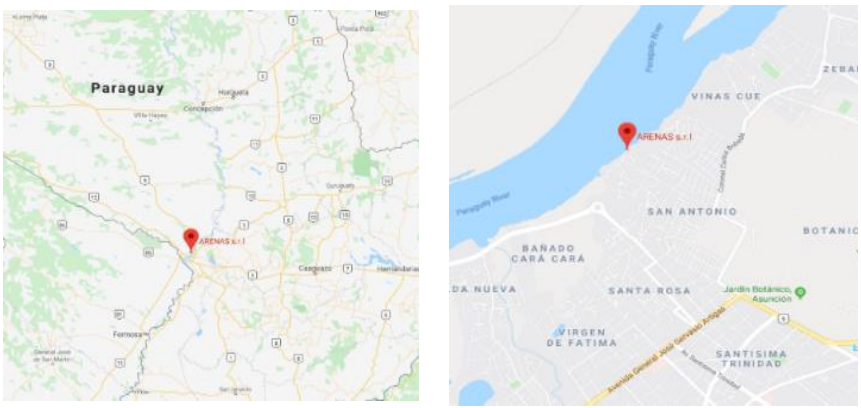


Figura 1. Ubicación de la Extracción de la muestra de Suelo.

El material se caracteriza por ser una arena limpia de granulometría uniforme, según la SUCS se clasifica como SP (Pobremente Graduado) y según la AASHTO se clasifica como A3. El tamaño de partículas de arena varía entre medias a finas, con menos del 1% pasante tamiz del #200. Los coeficientes de uniformidad (Cu) y de curvatura (Cc) obtenidos fueron 2,11 y 0.86 respectivamente. La curva granulométrica del material se muestra en la Figura 2.

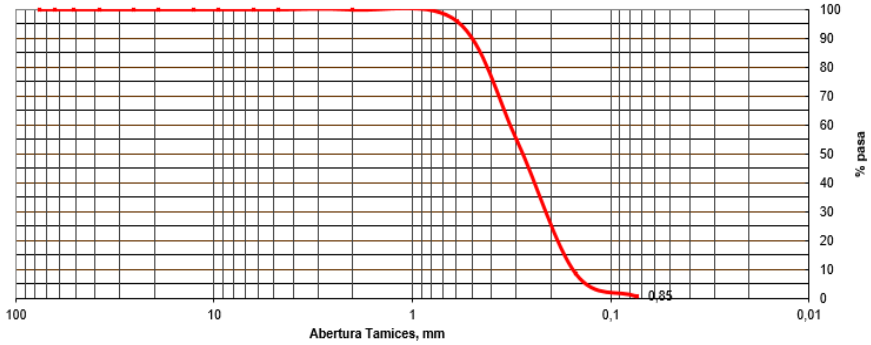


Figura 2. Curva Granulométrica de la Arena empleada

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia y Asfalto de la Universidad Nacional de Asunción. Los Índices Físicos obtenidos en dichos ensayos son presentados en la Tabla 1.

Tabla 1: Índices Físicos de la Arena empleada

Gravedad Especifica	2,635
Absorción (%)	0,298
Densidad mínima (kN/m^3)	15,4
Densidad máxima T-180 (kN/m^3)	17,89
Humedad óptima T-180 (%)	13.5
Humedad Natural (%)	0,075

2.1.2 Cemento

El cemento empleado para la elaboración de los cuerpos de prueba fue el Cemento Portland CP IV-32 de la empresa paraguaya INC. La gravedad específica del mismo es de 2,98 g/cm^3 y el módulo de finura de Blaine 3800 cm^2/g. En la Tabla 2 se adjunta el análisis químico y los ensayos físicos, provistos por la Industria Nacional del Cemento (INC).

Tabla 2: Análisis Químicos y Físicos del Cemento empleado

Análisis químico		
Componentes		**Especificaciones**
Perdida por	P.P.	2,42 %
Residuo insoluble	R.I.	4,87 %
Anhídrido sulfúrico	SO_3	2,91 %
Cal Libre	CaO	1,59 %
Ensayos físicos		
Residuo s/ Tamiz No. 200 (0,074 mm)		2,9%
Agua Pasta Normal		26,1

Fuente: Industria Nacional del Cemento (I.N.C.) - Paraguay

2.1.3. Agua

El agua empleada tanto para la preparación de muestras y ensayos fue destilada, a excepción de la carga de la cámara del equipo triaxial, realizada con agua proveniente de la red pública de abastecimiento.

2.2 Dosificación de los Cuerpos de Prueba

En la preparación de los cuerpos de prueba, para los ensayos de compresión triaxial, se empleó la humedad de 13 ± 0,5%. Los pesos específicos aparentes secos utilizados fueron de 16 kN/m^3 y 17 kN/m^3. Las cantidades de cemento empleadas fueron de 2, 4 y 6% respecto al peso específico aparente seco. La preparación comprendió las siguientes etapas: mezclado y compactación. Todos los materiales tanto la arena, el cemento y el agua fueron pesados con una precisión de 0,01 g. Las dosificaciones del cemento y el agua fueron determinadas en relación a la masa del material granular seco.

2.3. Moldeo y Curado de los Cuerpos de Prueba

Los cuerpos de prueba fueron elaborados según Norma ASTM D1632, evitando las pérdidas de humedad por evaporación, así como el inicio del fraguado del cemento. Este proceso de dosificación y mezclado tiene una duración de 20 minutos en promedio. Luego del mezclado de los materiales, éste fue dividido en tres partes iguales, además se previó un 20% de la mezcla para determinación de la humedad. Posteriormente se ha procedido a realizar la compactación empleando un gato hidráulico, dividiendo las tres camadas en un molde estandarizado de dimensiones internas de 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. Una vez culminada la compactación por camadas se realizó el desmoldeo de la probeta y se determinó su peso. Los cuerpos de prueba mejorados cemento fueron protegidos con bolsas de plástico herméticamente cerradas durante el tiempo de curado (14 días). Una vez transcurrido el tiempo de curado han sido obtenidas, mediante un calibrador digital de precisión 0,01 mm las dimensiones de la altura del cuerpo de prueba en cuatro secciones diametralmente opuestas y las dimensiones del diámetro en tres secciones ubicadas a 1/3, 1/2 y 2/3 de la altura, luego se ha procedido a calcular el promedio de los valores medidos, y, por último, fue determinado el peso de dicho cuerpo de prueba.

2.4. Ensayos de compresión triaxial

El equipo utilizado para la ejecución del ensayo fue el Sistema Automatizado Triaxial GDSTAS, y la norma utilizada para la ejecución de los ensayos triaxiales drenados fue la ASTM D 7181.
Por lo general, el ensayo consta de cuatro etapas principales: saturación, evaluación del parámetro B de Skempton, y por último consolidación y cizallamiento o corte (GDS Instrument, 2013)
Cabe destacar que todas las muestras ensayadas obtuvieron valores de parámetro B de Skempton mayores a 0,90.

2.5. Método de Cálculo de Daño.

Según (Lemaitre, 1992) existen muchas formas de medir el daño, no obstante, la elegida en este trabajo es la medición no directa basada en la influencia del daño en la elasticidad a través del acoplamiento de estado como:

$$\varepsilon_{e=\frac{\sigma}{E(1-D)}}$$

Este método destructivo requiere la elaboración de especímenes para realizar ensayos mecánicos. Asume un daño homogéneo uniforme durante la medición. Si $\tilde{E} = E\ (1 - D)$ se considera como el módulo de elasticidad efectivo del material dañado, los valores del daño pueden derivarse de mediciones de $\tilde{E}$, siempre que se conozca el módulo E de Young: $D = 1 - \frac{\tilde{E}}{E}$.

Donde:
E: módulo de elasticidad;
D: valor del daño obtenido en el ciclo.

3. Resultados

3.1. En cuanto a Ensayos de Compresión Triaxial

En las Figuras 3a., 3b., 3c, 3d, 3e. y 3f. se presentan los ensayos de compresión triaxial con presiones de confinamiento de 20, 50 y 100 kPa, para densidades de 16 kN/m3 y 17 kN/m3 respectivamente. De forma comparativa en cada figura se presentan las curvas obtenidas para cuerpos de prueba sin cemento y con 2%, 4% y 6% de cemento.

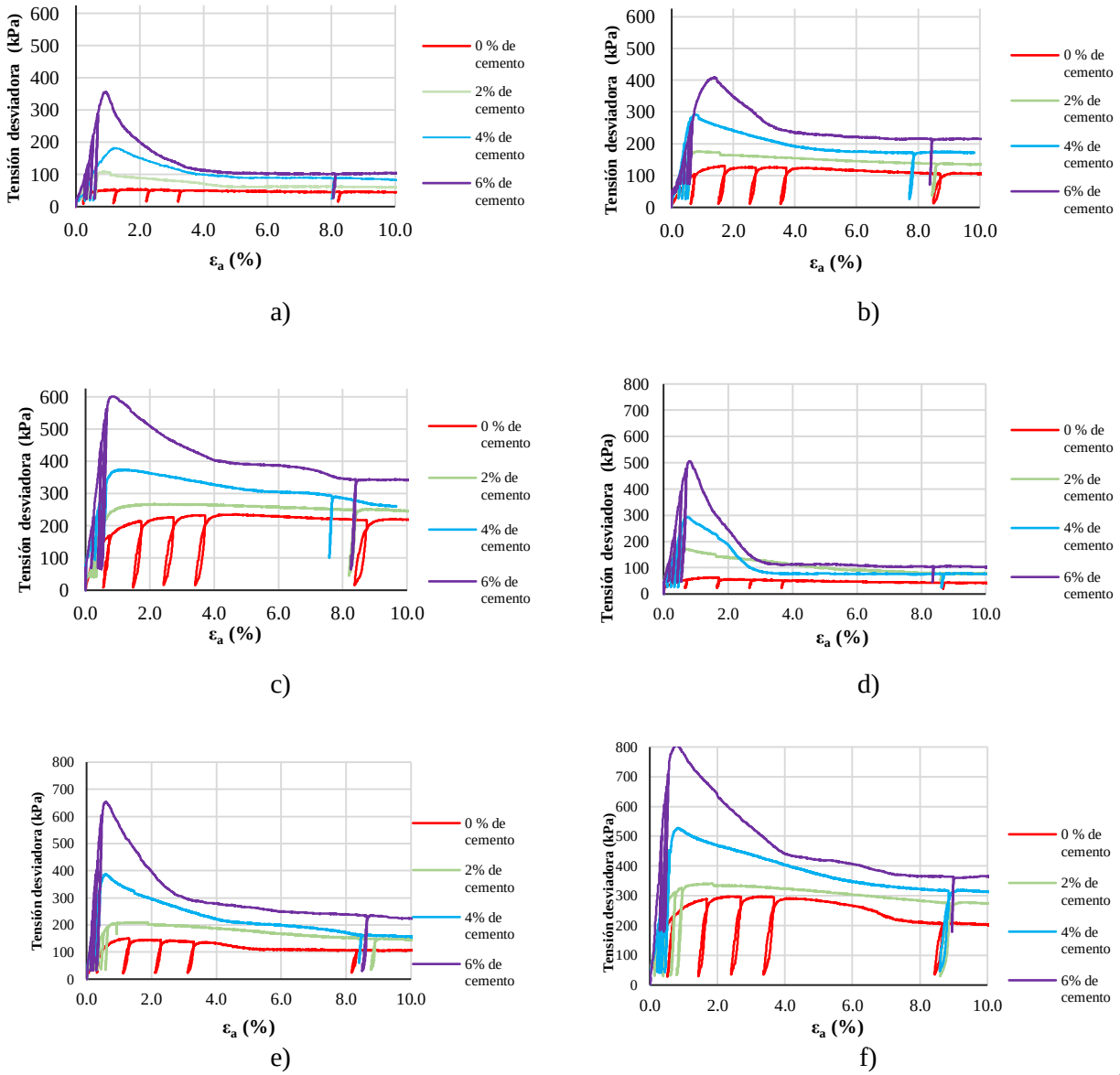


Figura 3. Gráfico Tensión vs Deformación con ciclos de CDR. a) para 20 kPa y densidades de 16 kN/m^3, b) para 50 kPa y densidades de 16 kN/m^3, c) para 100 kPa y densidades de 16 kN/m^3, d) para 20 kPa y densidades de 17 kN/m^3, e) para 50 kPa y densidades de 17 kN/m^3, f) para 100 kPa y densidades de 17 kN/m^3.

En las Tablas 3a y 3b se presentan los valores de c' y ϕ' para cada una de las mezclas, con y sin cemento para densidades 16 kN/m3 y 17 kN/m3. Los valores fueron obtenidos mediante la superficie de falla t' y s'. La superficie de falla para todos los casos fue realizada utilizando valores picos de resistencia.

Tabla 3: Valores de ϕ' y c' para las diferentes mezclas de arena-cemento con densidad 16 kN/m^3.

a) Para Densidades de 16 kN/m^3

0% de cemento			
σ_1 [kPa]	**σ_3 [kPa]**	**ϕ' [º]**	**c'[kPa]**
54,03	20	32	0
130,57	50		
235,28	100		
2% de cemento			
σ_1 [kPa]	**σ_3 [kPa]**	**ϕ' [º]**	**c'[kPa]**
107,93	20	30	20,7
175,95	50		
267,58	100		
4% de cemento			
σ_1 [kPa]	**σ_3 [kPa]**	**ϕ' [º]**	**c'[kPa]**
183,55	20	33	40,15
292,1	50		
373,61	100		
6% de cemento			
σ_1 [kPa]	**σ_3 [kPa]**	**ϕ' [º]**	**c'[kPa]**
355,7	20	38	66,67
408,48	50		
600,93	100		

b) Para Densidades de 17 kN/m^3

0% de cemento			
σ_1 [kPa]	**σ_3[kPa]**	**ϕ' [º]**	**c'[kPa]**
63,13	20	36	0
150,91	50		
298,2	100		
2% de cemento			
σ_1 [kPa]	**σ_3[kPa]**	**ϕ' [º]**	**c'[kPa]**
172,88	20	32	32,02
209,4	50		
341,65	100		
4% de cemento			
σ_1 [kPa]	**σ_3[kPa]**	**ϕ' [º]**	**c'[kPa]**
293,5	20	36	59,57
385,55	50		
527,11	100		
6% de cemento			
σ_1 [kPa]	**σ_3[kPa]**	**ϕ' [º]**	**c'[kPa]**
505,91	20	40	103,57
653,38	50		
805,61	100		

3.2. En cuanto a Determinación del Daño

En la Tabla 4. se muestran las diversas variables obtenidas del análisis de los datos registrados en el ensayo triaxial para una arena sin cemento y PC= 100 kPa. Donde:
E: módulo de elasticidad.
ε_a = Deformación axial.
El valor del daño debido a la variación del módulo elástico, según Lemaitre, debe obtenerse mediante la siguiente ecuación: Daño= 1 - $\frac{\tilde{E}}{E}$

Tabla 4. Variables determinadas en el análisis para arena sin cemento de 17 kN/m3 y PC= 100 kPa.

	ξa (%)	**E (MPa)**	**Daño**
E_0	0	36,08801802	
E_1	0,513	108,1347279	0
E_2	1,44	94,92806779	0,12213153
E_3	2,407	80,21859645	0,25816065
E_4	3,374	74,87421415	0,30758401
E_5	8,426	60,62737539	0,43933483

Debido a que se utilizó un medidor de deformación externo, la medición de la rigidez inicial E_0 pudo no ser tan precisa debido a errores de nivelación entre el top-cap y la cerda de carga o la simple acomodación de las partículas, pero luego, en los ciclos CDR, ya en la primera recarga puede decirse que la medición fue precisa puesto que los errores mencionados inicialmente se encuentran subsanados debido a que los cuerpos de prueba se encuentran en tensión en esta etapa. En ese sentido E_0 queda reemplazado por E_1. A continuación, se presentan los valores de daño obtenidos para las distintas presiones de confinamiento con sus respectivas densidades específicas y respectivos porcentajes de cemento. Se presentan en las Figuras 4, los valores de daño

obtenidos para presiones de confinamiento igual a 50 kPa con sus respectivas densidades específicas y respectivos porcentajes de cemento.

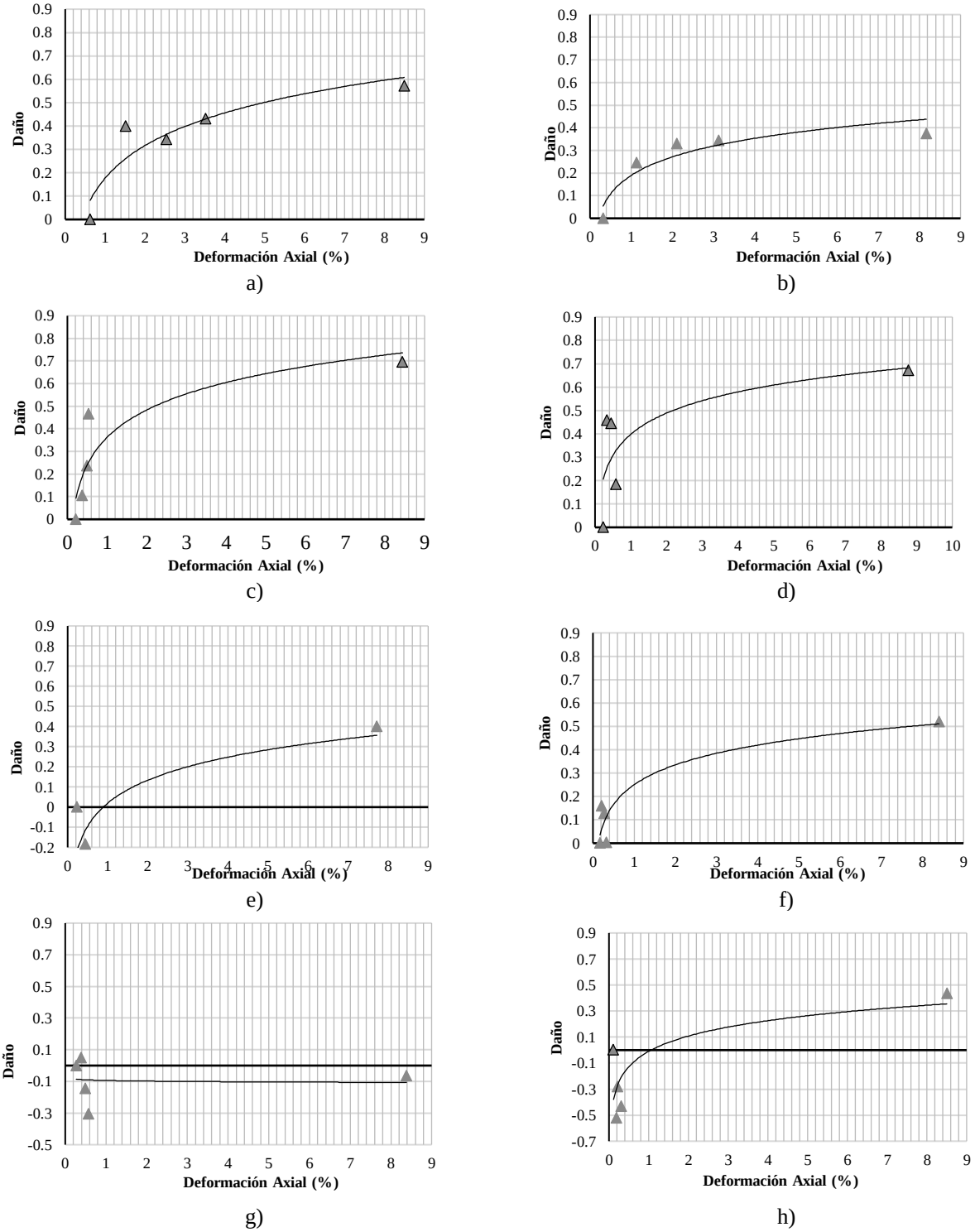


Figura 4. Variación de daño en función a la deformación axial para una presión de confinamiento de 50 kPa. a) Densidad 16 kN/m^3 con 0% de cemento, b) Densidad 17 kN/m^3 con 0% de cemento,, c) Densidad 16 kN/m^3 con 2% de cemento, d) Densidad 17 kN/m^3 con 2% de cemento, e) Densidad 16 kN/m^3 con 4% de cemento,, f) Densidad 17 kN/m^3 con 4% de cemento, g) Densidad 16 kN/m^3 con 6% de cemento, h) Densidad 17 kN/m^3 con 6% de cemento

4. Conclusiones

4.1. En cuanto a los ciclos de Carga-Descarga-Recarga (CDR)

El comportamiento observado durante los ciclos CDR es predominantemente elastoplástico, presentándose durante las descargas grandes deformaciones plásticas irreversibles, además, en la recarga se observa una parte elástica. Se observa una mayor rigidez, pero también una mayor fragilidad para mayores porcentajes de cemento coincidiendo con la literatura internacional.

4.2. En cuanto a la incidencia de la presión de confinamiento

Se confirma que, para las combinaciones de densidad y porcentajes de cemento investigados se obtienen mayores resistencias con el aumento de la presión de confinamiento. Además, se observó que el módulo de elasticidad (E) crece con el aumento de las tensiones confinantes tanto para la arena sin refuerzo como para la arena cementada.

Para la evolución del daño, no se logra observar una tendencia de su comportamiento basada en la presión de confinamiento exclusivamente, en algunos casos se observó una disminución del daño con el aumento de la presión confinante, y en otros casos un aumento del daño con el aumento de la presión confinante. Para obtener un patrón del daño con la presión de confinamiento debería realizarse un estudio estadístico de forma minuciosa.

4.3 En cuanto a la incidencia de la densidad y del porcentaje de cemento en la evolución del daño.

Se pudo demostrar con los resultados obtenidos de los ensayos realizados, que un aumento en la dosificación del cemento aporta un aumento significativo en la tensión pico. Así también, un mayor daño fue medido en las mezclas de suelo cemento en comparación al suelo natural.

4.4 En cuanto a los parámetros que puedan ser tratados en un modelo constitutivo

Se puede observar que para la arena estudiada tanto la cohesión (c') como el ángulo de fricción (ϕ') aumentaron de manera casi lineal con el aumento de agente cementante.

AGRADECIMENTOS

Los autores expresan su gratitud con el CONACYT, por su aporte y contribución a la Investigación y a la FIUNA por el uso de las infraestructuras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM D1632. (2017). Standard Practice for Making and Curing Soil-Cement Compression and Flexure Test Specimens in the Laboratory. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM D7181. (2011) Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Avitia, Rodolfo. (1991). *Suelo-Cemento.* Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto.

Caballero Ocampos, E., & Paats Nicora, M. (2019). *Analisis Experimental del Comportamiento de un Suelo Granular Cementado Artificialmente y Reforzado con Fibra de Pollipropileno, Sometido a Ensayos Triaxiales de Carga-Descarga-Recarga.*

GDS, T. A. (2013). *PART ONE: INTRODUCTION TO TRIAXIAL TESTING*. Obtenido de: http://www.https://www.gdsinstruments.com/__assets__/pagepdf/000037/Part%201%20Introduction%20to%20triaxial%20testing.pdf

Instituto Torroja. (1987). *La Tierra, material de construcción*. Madrid, España.

Lemaitre, J. (1992). *A Course on Damage Mechanics.* Berlin: Springer Science & Business Media.

Lemaitre, J., & Desmorat, R. (2005). *Engineering Damage Mechanics. Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures.* Cachan, France: Springer Science & Business Media.