

# Análisis del comportamiento elastoplástico con daño continuo de un suelo granular cementado artificialmente y reforzado con fibras de polipropileno

Eduardo BITTAR<sup>a,1</sup>, Cesar IBERBUDEN<sup>a</sup>, Arturo RUIZ DIAZ<sup>a</sup>, Rubén A. LÓPEZ<sup>a</sup>, Antonio AQUINO<sup>a</sup> y Rubén Alejandro QUIÑONEZ<sup>a</sup>  
<sup>a</sup> *Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay*

**Resumen.** La inclusión de fibras para el refuerzo de suelos tiene como objetivo mejorar el desempeño de materiales susceptibles a problemas causados por el surgimiento de fisuras, especialmente en suelos cementados que conllevan a pérdidas de capacidad soporte del material. A su vez, las fibras funcionan como elementos de tracción por medio de mecanismos de interacción en su interfaz, además mejoran la resistencia mecánica del suelo a compresión, tracción, corte e incluso a flexión y actúan en el control de propagación de fisuras. La mecánica del daño es el estudio de los mecanismos involucrados en el deterioro de los materiales cuando son sometidos a cargas y nos permiten describir el comportamiento en el proceso de agrietamiento de la masa. El programa experimental de este estudio, primeramente, caracterizó físicamente del suelo natural siguiendo las normativas correspondientes. Luego, se realizó la caracterización mecánica y física de las fibras de polipropileno. Por último, fueron realizados ensayos triaxiales estáticos con ciclos de carga-descarga-recarga (CDR) del suelo cementado y el suelo cementado reforzado con fibras, para varios niveles de deformación axial. Los resultados son presentados en curvas de tensión-deformación para el suelo-cemento y suelo-cemento-fibra en estudio. Subsecuentemente, la obtención del daño fue determinado a partir de los parámetros elásticos y mecánicos del suelo-cemento y suelo-cemento-fibra.

**Palabras Clave.** Suelo cemento, fibras de polipropileno, cargas cíclicas, daño continuo.

## 1. Introducción

Nuevos materiales han sido desarrollados actualmente, basados en materiales tradicionales con incorporación de elementos de refuerzo, como son las fibras de polipropileno en concretos. La estabilización de suelos utilizando cemento Portland es ampliamente utilizada con suelos granulares. Arenas cementadas poseen elevadas resistencias al esfuerzo cortante, pero tienen un comportamiento frágil. Para [1], y [2] el mayor potencial de materiales compuestos fibrosos está en el estado post-fisuración, donde las fibras contribuyen de forma más efectiva en la resistencia del material,

---

<sup>1</sup> Eduardo Bittar, Docente Investigador, Laboratorio de Mecánica Computacional, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay. e-mail: ebittar@ing.una.py

umentando así su capacidad de absorción de energía. Esto se debe a que la deformación necesaria para causar fisuras en una matriz cementada es muy inferior a la elongación de las fibras, en las cuales poco o ningún aumento de tensión de fisuración se espera. En el caso de que se produzca un aumento de la resistencia a la compresión del compuesto, es necesario el uso de una fibra más rígida que la matriz, así como la adherencia del refuerzo con la matriz debe impedir movimientos relativos entre las partes. Las fibras no impiden la formación de fisuras en el compuesto, pero son capaces de aumentar la resistencia a la tracción por el control de la propagación de las fisuras [1]. Según [2], las fibras mantienen las interfaces de las fisuras juntas, beneficiando las propiedades mecánicas en el estado post-fisuración, o sea, aumentando la ductilidad. Las fibras que cruzan las fisuras contribuyen al aumento de la resistencia, de la deformación de ruptura y de la tenacidad de los compuestos. Según [3], las fibras en una matriz cementada pueden en general tener dos efectos importantes. En primer lugar, tienden a reforzar el compuesto sobre todos los modos de carga que inducen tensiones de tracción, es decir, tracción indirecta, flexión, cortante, y, secundariamente, mejoran la ductilidad y la tenacidad de una matriz con características frágiles.

La Mecánica del Daño Continuo fue introducida por primera vez por [4] y alcanzó actualmente niveles que permiten su aplicación a problemas prácticos de ingeniería. En contraste con la Mecánica de Fractura, que considera el proceso de iniciación y crecimiento de microfisuras como un proceso discontinuo, la mecánica del daño continuo utiliza variables continuas relacionadas con la densidad de estos defectos para describir el deterioro del material antes de la iniciación de macrofisuras. En conocimientos generales, el daño de los materiales es el transcurso físico progresivo por el cual se rompen los mismos. La mecánica del daño es el estudio, a través de variables mecánicas, de los elementos involucrados en el deterioro de los materiales cuando son sometidos a cargas. Recientemente ha sido desarrollado un modelo de material que describe el comportamiento de suelos con fibras mediante un modelo de Drucker-Prager modificado [5]. Este modelo considera la distribución de daño en forma anisotrópica, siendo realizada la implementación para una versión simplificada (isotrópica) debido a la necesidad de utilizar técnicas más complejas de caracterización del material.

Se han propuesto muchas teorías de medición del daño, esto se debe principalmente al hecho de que dependen de la escala donde ocurre el fenómeno. La Tabla 1 presentada por [6] brinda una idea sobre qué método debe utilizarse para fines prácticos según la calidad requerida, para cada tipo específico de medición de daño, donde, mientras mayor cantidad de cruces, más aconsejado es el método.

**Tabla 1.** Calidad de medición del daño según el tipo de fractura [6].

Forma de medición	Daño	Frágil	Dúctil	Fluencia	Bajos ciclos de fatiga	Altos ciclos de fatiga
Directa	$\frac{\delta S_D}{\delta S}$	x	xx	xx	x	x
Módulo Elástico	$1 - \frac{E}{E_0}$	xx	xxx	xxx	xxx	
Ondas de ultrasonido	$1 - \frac{P_1^2}{V_L^2}$	xxx	xx	xx	x	x
Densidad	$1 - \frac{\rho^2}{\rho_0^2}$		xx	x	x	
Resistencia eléctrica	$1 - \frac{V}{V_0}$	x	xx	xx	x	x
Resistencia plástica cíclica	$1 - \frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_0}$		x	x	xx	x
Fluencia lenta terciaria	$1 - \left(\frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_p^0}\right)^{1/N}$		x	xxx	x	

## 2. Programa Experimental

Este programa experimental consta de 2 partes. Primeramente, la caracterización de los materiales, posteriormente se definió la cantidad de ensayos triaxiales de bajos ciclos a realizar, estudiando dos porcentajes de cemento (3 y 5%), dos pesos específicos aparentes secos (17 y 18 kN/m<sup>3</sup>) a 8,4% de humedad (la óptima para 18 kN/m<sup>3</sup>) y tres presiones de confinamiento (20, 50 y 100 kPa). Todos los ensayos fueron realizados a un tiempo de curado de 7 días.

### 2.1. Materiales

El suelo utilizado en esta investigación proviene de una cantera localizada en el barrio Viñas Cué de la ciudad de Asunción-Paraguay, la misma es extraída del Río Paraguay en una zona cercana al puente Remanso Castillo. El material se caracteriza por ser una arena limpia, de granulometría uniforme (mal graduada), con tamaño de partículas de arena que varían entre medias a finas, con menos de 1% de pasante tamiz #200. La curva granulométrica del material, Figura 1, fue determinada según las recomendaciones de la norma ASTM D 2487 [7].

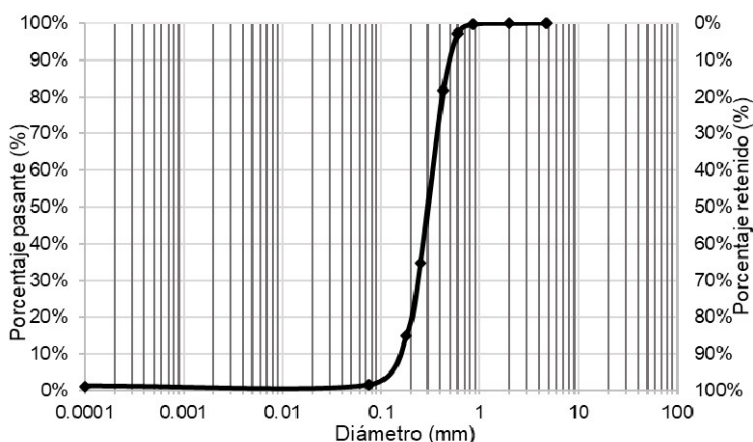


Figura 1. Curva granulométrica de la arena.

El cemento empleado para la elaboración de los cuerpos de prueba fue Cemento Portland CPIV-32, de la empresa paraguaya INC. La gravedad específica del mismo es de 2,97 g/cm<sup>3</sup> y el módulo de finura 3,920 cm<sup>2</sup>/g.

Las fibras utilizadas como refuerzo del material granular son poliméricas de polipropileno *FibroMac*® 12. La Tabla 2 presenta las principales características, definidas por el fabricante de las fibras utilizadas.

Fue utilizada agua destilada para la preparación de las muestras y la realización de los ensayos, a excepción de la carga de la cámara del equipo triaxial, donde fue utilizada agua proveniente de la red pública de abastecimiento.

**Tabla 2.** Propiedades físicas y mecánicas de las fibras, Maccaferri América Latina.

<b>Propiedades geométricas</b>	
Diámetro	0.018 mm
Sección	Circular
Longitud	12 mm
<b>Propiedades físicas</b>	
Peso específico	0.91 g/cm <sup>3</sup>
<b>Propiedades mecánicas</b>	
Módulo de elasticidad	3 GPa
Resistencia última a la tracción	300 MPa
Deformación en la ruptura	80%

## 2.2. Métodos

Existen diversos métodos para medir el daño en materiales entre los que se encuentran métodos directos e indirectos (destructivos y no destructivos). En este trabajo se utilizó como método de medición de daño el tipo destructivo, mediante la variación del módulo de elasticidad ya que, según [6], resulta muy aconsejable frente a casos de fractura frágil, dúctil, fluencia y fatiga de bajos ciclos. En ese sentido, fueron ejecutados ensayos triaxiales con ciclos de Carga-Descarga-Recarga (CDR) y se obtuvieron los parámetros elásticos, necesarios para medir el daño del geomaterial.

### 2.2.1. Confección de especímenes y curado

El moldeo de los cuerpos de prueba para los ensayos triaxiales de bajos ciclos de carga y descarga fue realizado en un molde cilíndrico partido en tres partes y hecho de acero, con dimensiones suficientes para la confección de las muestras con 50 mm de diámetro y 100 mm de altura. La confección de la mezcla fue realizada a través de los procedimientos de pesaje, mezcla, compactación, desmolde, medición y curado. Después del pesaje de los materiales (suelo, cemento, fibra y agua) en balanzas con precisión de 0,01g, para cada confección, fue homogeneizado el suelo y el cemento portland para posteriormente adicionar agua destilada y las fibras, hasta que la mezcla alcance una consistencia uniforme. Terminada la preparación de la mezcla, esta fue compactada estáticamente en tres capas en los moldes, de manera que cada capa cumpla con las especificaciones de humedad y peso específico aparente seco buscado, tomando el cuidado de escarificar la parte superior terminada de la primera y segunda capa con el fin de aumentar la integración entre capas. Una vez concluido el moldeo, el cuerpo de prueba fue extraído inmediatamente del molde para la medición de su masa y dimensiones (diámetro y altura) con precisión de 0,01g y 0,01 mm respectivamente, para finalmente ser colocadas en bolsas de plástico identificadas y cerradas para evitar variaciones significativas del porcentaje de humedad.

Finalmente, los cuerpos de prueba fueron llevados a la cámara de curado durante 7 días, con temperatura controlada de  $23^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

### 2.2.2. Ensayos triaxiales de bajos ciclos de carga y descarga

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 [8]. El proceso de saturación fue realizado por percolación de agua a través de la muestra y por presión. La garantía de saturación de la muestra fue monitoreada a través de la medición del parámetro B según [9]. Todos los ensayos realizados, mostraron valores de parámetro B iguales o mayores a 0,80. Luego de la fase de saturación, las muestras eran consolidadas hasta volumen constante y luego ensayadas a partir de una trayectoria convencional drenada. La velocidad de carga fue de 2 mm/hora, mostrándose una velocidad en la cual no se detectaron presiones de poros. En la Figura 2, se muestra la curva obtenida en cada ensayo triaxial, donde la metodología fue realizar ciclos de carga-descarga-recarga cada 1% de deformación. El punto de inflexión mostrado en la Figura 2, indica el inicio de carga ejercido en la muestra, en ese sentido, fueron despreciadas las cargas iniciales que pudieran deberse por fricción del pistón y/o acomodamiento de la muestra. De esta forma, las curvas fueron trasladadas al origen a partir del punto de inflexión. Por último, se realizó una recarga final hasta llegar a una deformación total de 15%.

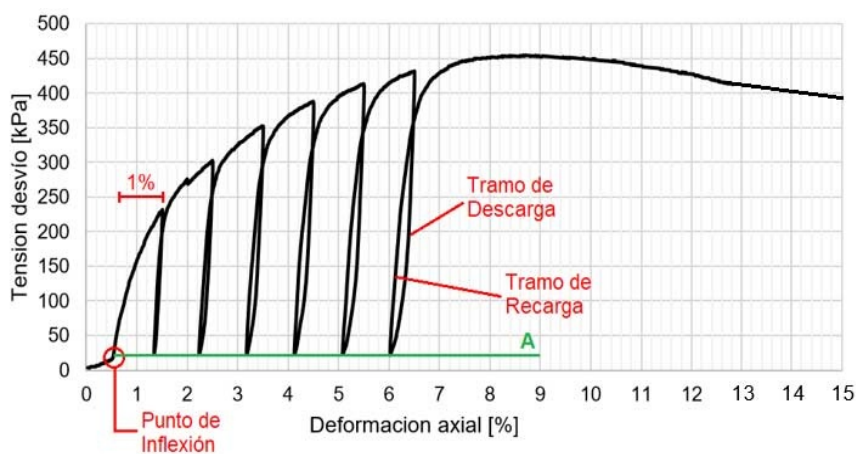


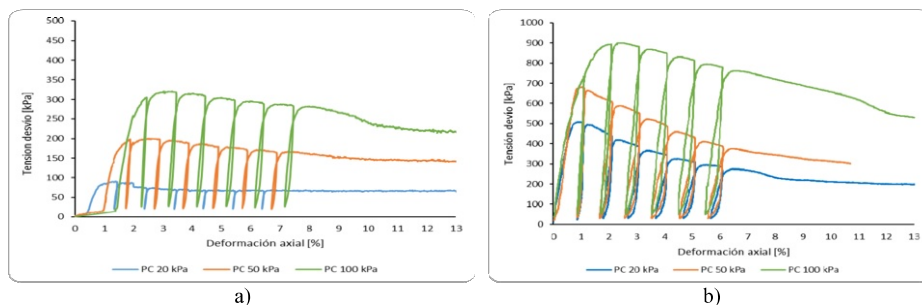
Figura 2. Esquema de cargas y deformaciones realizadas sobre los cuerpos de prueba.

## 3. Resultados

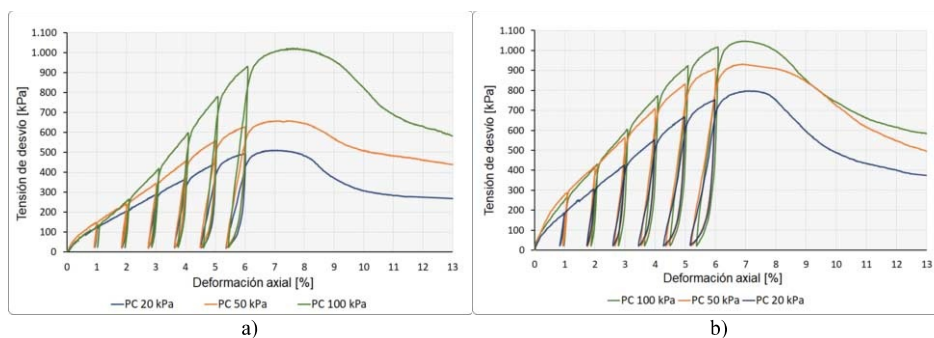
### 3.1. Ensayos triaxiales de bajos ciclos de carga y descarga

Las Figuras 3, 4 y 5 muestran el efecto de la adición de cemento y fibras en el comportamiento del geomaterial sometido a 6 ciclos de carga y descarga con 3 diferentes presiones de confinamiento. En la Figura 3a) se representa el comportamiento de la arena natural compactado a un peso específico aparente seco (PE) máximo de  $16,7 \text{ kN/m}^3$  y humedad óptima de 11,4%. En la Figura 3b) se representa el comportamiento de la arena estabilizada con 3% de cemento Portland y PE de  $17 \text{ kN/m}^3$  después de 7 días de curado. Puede observarse el aumento importante de la resistencia pico del geomaterial, su mayor rigidez y fragilidad con la adición de

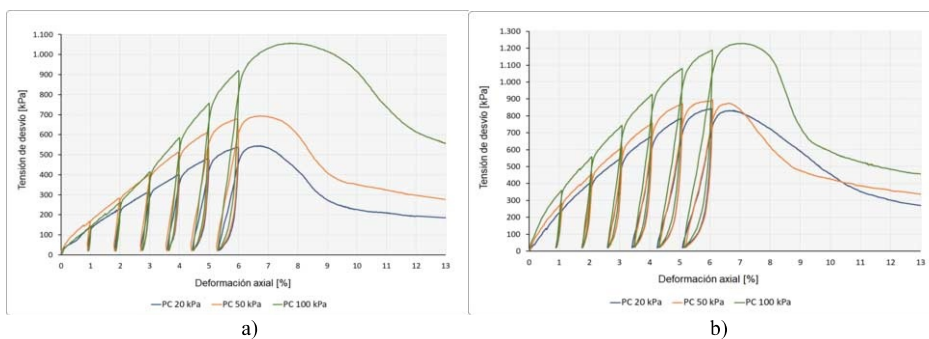
cemento. En las Figuras 4a) y 4b) puede observarse el efecto de la adición de fibras como refuerzo del suelo-cemento con PE de  $17 \text{ kN/m}^3$ . Aumenta notablemente la ductilidad del material, y también influye en la resistencia de pico de éste. Las Figuras 5a) y 5b) con PE de  $18 \text{ kN/m}^3$  a 3 y 5% se pueden observar comportamientos similares a lo anteriormente mencionado.



**Figura 3.** Ciclos de carga y descarga para cuerpos de prueba con PE  $17 \text{ kN/m}^3$  y 0.5% de fibra. a) 3% de cemento b) 5% de cemento.



**Figura 4.** Ciclos de carga y descarga para cuerpos de prueba con PE  $17 \text{ kN/m}^3$  y 0.5% de fibra. a) 3% de cemento b) 5% de cemento.



**Figura 5.** Ciclos de carga y descarga para cuerpos de prueba con PE  $18 \text{ kN/m}^3$  y 0.5% de fibra. a) 3% de cemento b) 5% de cemento.

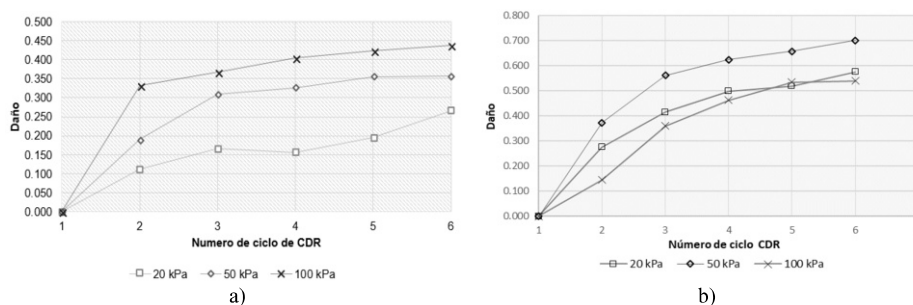
### 3.2. Análisis de daño en el geomaterial

En las Figuras 6, 7 y 8 se pueden observar el efecto de la adición de cemento y fibras en el daño del geomaterial. Este parámetro fue determinado utilizando el método del módulo elástico según la Tabla 1 donde el valor de daño fue calculado a partir de la variación del módulo elástico mediante la siguiente ecuación:

$$D = 1 - E_i / E_0 \quad (1)$$

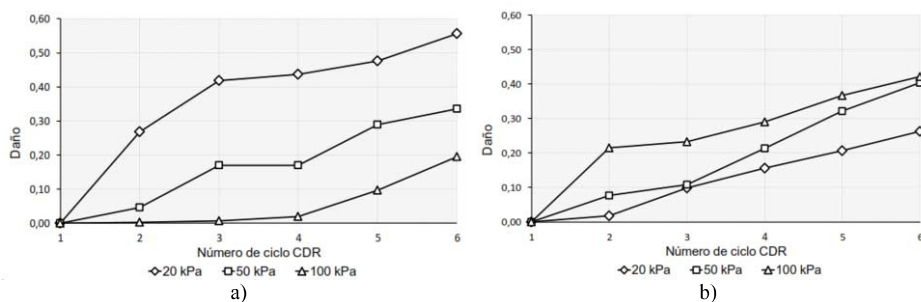
donde E: módulo de elasticidad; D: valor del daño obtenido en el ciclo. La ecuación sugiere que para un estado de reposo el daño es 0. Sin embargo, la determinación de módulos iniciales resulta difícil de determinación mediante el ensayo triaxial. De igual forma, las mediciones fueron realizadas notándose incoherencia en las mediciones de  $E_0$ . Estas mediciones pudieron ser afectadas por nivelación entre el *top-cap* y el asiento esférico de la célula de carga o un simple acomodamiento de las partículas.

En ese sentido, en todos los casos, el primer valor de daño fue obviado, tomándose como valor inicial del daño el valor determinado para  $E_1$ . En todos los casos, se observa que el valor de E aumenta a medida que aumenta la presión de confinamiento, presentando un comportamiento similar para cada una de las presiones estudiadas. En la Figura 6a) puede observarse la evolución del daño sobre el suelo natural variando de 0,25 a 0,5 luego de 6 ciclos de carga y descarga, realizados a diferentes presiones de confinamiento. En la Figura 6b) se observa que la adición de 3% de cemento aumentó el daño variando de 0,5 a 0,7 luego de 6 ciclos de carga y descarga, realizados a diferentes presiones de confinamiento. Estas figuras muestran que existe un mayor daño en materiales cementados debido al aumento de la rigidez, que torna a los materiales susceptibles a una ruptura frágil.



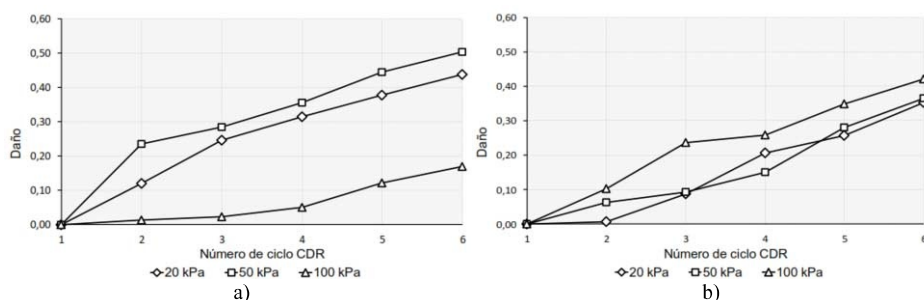
**Figura 6.** Evolución del daño del material para distintas presiones de confinamiento. a) Suelo natural. b) suelo-cemento (PE 17 kN/m³ y 3% de cemento).

En las Figuras 7a y 7b con PE de 17 kN/m³ se puede observar una disminución del daño del material cementado a 3 y 5%, respectivamente, con la adición de 0,5% fibras. Con la adición de fibras y 3% de cemento (Figura 7a) el daño varió de 0,2 a 0,55, aproximadamente, luego de 6 ciclos de carga y descarga a diferentes presiones de confinamiento. Con la adición de fibras y 5% de cemento (Figura 7a) el daño varió de 0,28 a 0,40, aproximadamente, luego de 6 ciclos de carga y descarga a diferentes presiones de confinamiento.



**Figura 7.** Evolución del daño del suelo cemento con PE 17 kN/m<sup>3</sup> y 0,5% de fibras para distintas presiones de confinamiento. a) 3% de cemento b) 5% de cemento.

En las Figuras 8a y 8b con PE de 18 kN/m<sup>3</sup> a 3 y 5% se pueden observar comportamientos similares a lo anteriormente mencionado.



**Figura 8.** Evolución del daño del suelo cemento con PE 18 kN/m<sup>3</sup> y 0,5% de fibras para distintas presiones de confinamiento. a) 3% de cemento b) 5% de cemento.

#### 4. Conclusiones

La adición de cemento mostró aumentar la resistencia pico del suelo arenoso, su rigidez y por ende su fragilidad. Así también, un mayor daño fue medido en las mezclas de suelo cemento en comparación al suelo natural.

La adición de fibras de polipropileno al suelo cemento mejoró el comportamiento frágil de éste dándole mayor ductilidad, incluso aumento de resistencia de pico. Además, el daño se vio disminuido con la adición de fibras al suelo cemento, lo que afirmaría su efectividad contra la formación de fisuras en el geomaterial.

La variación tanto de la cantidad de cemento (de 3 a 5%) como de los PE (de 17 a 18 kN/m<sup>3</sup>) influenciaron en el comportamiento tensión-deformación del material, mas no tuvieron influencia significativa en el daño de éste.

La variación de las presiones de confinamiento (de 20 a 100 kPa) influenciaron en el comportamiento tensión-deformación del material. En términos del daño se pudo observar que, en el suelo natural, mayores presiones de confinamiento generaron mayor daño, mientras que en el suelo cemento y el suelo cemento reforzado con fibras mayores presiones de confinamiento registraron menores daños.



## **Agradecimientos**

Los autores expresan su gratitud con el Laboratorio de Mecánica Computacional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción y al CONACYT.

## **Referencias**

- [1] Taylor, G. D. (1994) *Materials in construction* (2nd ed.). London: Longman Scientific & Technical.
- [2] Hannant, D. J. (1978) *Fibre Cements and Fibre Concretes*. Wiley.
- [3] Johnston, C. D. (2010). *Fiber-reinforced cements and concretes*. v. 3, Crc Press.
- [4] Kachanov, L. M., &Krajcinovic, D. (1987). Introduction to continuum damage mechanics. *Journal of Applied Mechanics*, 54, 481.
- [5] López, R. (2016) Desenvolvimento e implementação de uma lei constitutiva elastoplástica com dano contínuo para solos reforçados com fibras. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS.
- [6] Lemaitre, J. A (1996). *Course on damage mechanics*. Springer Science & Business Media.
- [7] ASTM D2487. (2017). *Standard classification of soils for engineering purposes*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [8] ASTM D7181. (2011) *Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [9] Skempton, A. W. (1954). The pore-pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, 4(4), 143-147.