

Resistencia a la Compresión Simple y Tipo de Rotura de Probetas de Suelo Residual Compactado con Adición de Cemento Portland Normal

Korpys, Camila I.^a; Fernandez, Guadalupe G.^b; Bys, Nora C.^b; Gonzalez Mariano J.^b; Gonzalez, Nahuel M.^b; Gomez, Emilio E.^b; Bogado, Gustavo O.^{a,c}

^a *Integrante del proyecto, Docente, Laboratorio de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b *Integrante del proyecto, Estudiante, Laboratorio de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^c *Consejo de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, CONICET.*

e-mails: camila.korpys@fio.unam.edu.ar; ggfernandez30@gmail.com; cathebys12@gmail.com; mariano.study2019@gmail.com; nahuelgonzalez456@gmail.com; emilioenrique@gmail.com; gustavobogado@conicet.gov.ar

Resumen

La resistencia a la compresión simple, tipo de rotura, y deformación de rotura de probetas elaboradas con suelo residual y con la incorporación de diferente contenido de cemento, son evaluadas en probetas de 49 milímetros de diámetro y 100 milímetros de altura. Se realizaron ensayos Proctor con suelo sin cemento y con mezclas de suelo y la incorporación de 4%, 6% y 8% de cemento en peso. A partir de la determinación de la densidad seca máxima y humedad óptima para cada caso, se moldearon las probetas para ensayo de compresión simple. En el caso de probetas de suelo sin cemento, se moldearon, además, probetas en densidad seca del 95 % de la densidad seca máxima, con sus correspondientes humedades de referencia, para contar con datos en rama seca y rama húmeda del ensayo Proctor. Se realizaron ensayos de compresión simple para la definición de resistencia, deformación de rotura, y tipo de rotura, evaluando su variación en el tiempo, conforme los resultados a 1, 7, 14, y 28 días de curado del cemento. Los resultados permitieron identificar el efecto de la mejora lograda en los valores de resistencia, con aumento de la rigidez de las muestras, conforme el incremento de los días de curado.

Palabras Clave – Suelos residuales, Suelo cemento, Resistencia a la Compresión Simple.

1 Introducción

Los suelos residuales de la región en su gran mayoría provienen de la meteorización de la roca matriz, el basalto, y no han sido transportados desde su ubicación original. En los distintos usos del suelo como elemento constructivo, este puede ser trasladado mecánicamente a otros sitios, pero en ese caso requiere mecanismos de compactación o mejoramiento que modifican sus propiedades geomecánicas mediante la incorporación de energía.

Estos suelos, según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), generalmente corresponden a las categorías ML o MH (limos arcillosos de baja o alta plasticidad), mientras que para el sistema de clasificación HRB (Highway Research Board), estos suelos suelen clasificarse como A-7-5 o A-7-6. Ambas clasificaciones detalladas, indican que el suelo en estudio resulta de

comportamiento no deseable en obras civiles, y en particular para el caso de sub-bases de caminos, se esperaría que presente un comportamiento geomecánico malo a muy malo.

Esto último puede ser cuestionado por resultados de varios estudios geotécnicos realizados en la actividad privada, en laboratorios de organismos gubernamentales, y en Universidades de la región, así como el sin número de obras de ingeniería llevadas a cabo con estos suelos, algunas de más de 40 años, y que han demostrado óptimos resultados.

De allí la importancia de caracterizar los suelos regionales a fin de conocer sus propiedades físicas y mecánicas cuando son empleados como elemento compactado, a fin de contar con un registro y tratamiento adecuado para poder optimizar su uso.

En cuanto al análisis de mezclas de suelo con cemento, o aun el estabilizado o mejora esperable en los suelos al incorporar cemento, las recomendaciones suelen indicar contenidos superiores al 10% en peso, lo cual resulta totalmente inviable en la región, dado los costos asociados.

En este trabajo se realizaron ensayos para determinar la respuesta del suelo estudiado utilizando el método Proctor Normal, con contenidos de cemento del 0%, 4%, 6% y 8%. Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión simple permiten identificar tanto la resistencia última, como el estado de deformación de rotura y tipo de rotura asociado para diferentes periodos de curado del cemento: 1, 7, 14 y 28 días.

2 Metodología

La muestra de suelo utilizada en este trabajo fue tomada de la Ciudad de Oberá, provincia de Misiones, en un sitio ubicado en proximidad a la traza de la ex Ruta Nacional N° 103 (Coordenadas 27°28'44.8"S; 55°04'36.8"W). Se trasladó la misma en condiciones adecuadas de almacenamiento y conservación al Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC) de la Facultad de Ingeniería, donde se dejó a disposición para la realización de los ensayos planificados.

En general las muestras de suelo en campo cuentan con alto contenido de humedad natural, lo que hace necesario secar el suelo al aire durante aproximadamente una semana, para luego recién poder trabajarla. La primera tarea de laboratorio es el tamizado con tamiz N° 4, y posteriormente el almacenamiento en bolsas plásticas convenientemente identificadas.

En cuanto a los ensayos realizados sobre el suelo sin cemento, se efectuaron pruebas de caracterización, límites de Atterberg (IRAM 10501-2007) [1], granulometría por tamizado vía húmeda (IRAM 10507-1986) [2], clasificación de suelos (IRAM 10509-1982) [3] y determinación de gravedad específica (IRAM 10503-2007) [4].

Para los ensayos de compactación, se procedió conforme la Norma IRAM 10511 [5], considerando las recomendaciones específicas de la Norma VN-E20-66 [6].

A partir de los resultados del ensayo Proctor, se planificó la secuencia de moldeo de probetas para los ensayos de compresión simple.

Las muestras de suelo sin cemento fueron acondicionadas en bolsas plásticas con un período de maceración de 24 horas antes de la compactación correspondiente, mientras que, en las muestras

con adición de cemento, éste se incorporó inmediatamente antes del moldeo, mezclando según la dosificación en peso determinada para cada caso.

En la Figura 1 se ilustra el proceso de incorporación de agua mediante rociador, el mezclado correspondiente al incorporar cemento, la compactación de la probeta para compresión simple en el molde de 49 milímetros de diámetro por 100 milímetros de alto, el escarificado necesario entre capas para lograr adherencia, que se puede ver finalizada al retirar cabezal, semicilindros laterales, y el acetato que se incorpora en el molde previo a la compactación. Finalmente la probeta montada en la prensa con los comparadores de carga y deformación necesarios para tomar los datos de ensayo.

Como se aprecia en la probeta obtenida, el procedimiento de compactación se realiza en cuatro capas de 25 milímetros cada una, añadiendo el suelo acondicionado a la humedad de referencia para alcanzar la densidad predefinida.



Fig. 1. Imágenes Fotográficas del procedimiento de moldeo en laboratorio.

3 Presentación y Análisis de Resultados

Los ensayos desarrollados en cuanto a las propiedades índice del suelo en estudio permiten afirmar que: de ensayos de granulometría por lavado tamiz 200, más del 95% de granos de suelo es pasante; de ensayos de límites de constancia la clasificación SUCS indica limo de baja plasticidad (ML).

Respecto de los ensayos Proctor realizados, se detalla en la Tabla 1 los resultados obtenidos para los casos analizados y que sirven de base para el moldeo posterior de las probetas a ensayar en compresión simple.

La Tabla 1 resume los resultados obtenidos de Humedad Óptima (HO) y Densidad Seca Máxima (DSmax) alcanzada en cada uno de los ensayos Proctor realizados, con incorporaciones de cemento del 0%, 4%, 6% y 8% en peso. Adicionalmente, se presentan los valores de humedad y densidad de referencia para el suelo sin cemento, calculados al 95% de la densidad seca máxima y sus respectivas humedades (RS: rama seca; RH: rama húmeda).

Tabla 1: Resultados de Ensayos Proctor Método Normal (SS: Suelo Solo; SC: Suelo Cemento)

Muestra	SS-0%	SS-0%	SS-0%	SC-4%	SC-6%	SC-8%
RS [%]	25.60	-	-	-	-	-
HO [%]	-	28.75	-	28.99	28.27	27.61
RH [%]	-	-	31.80	-	-	-
DSmax [gr/cm³]	1.379	1.496	1.424	1.490	1.511	1.500

En análisis de los resultados presentados en Tabla 1 indica una tendencia al aumento de la densidad seca máxima alcanzada para el caso de incorporación de cemento, así como una disminución de la humedad óptima respecto a la referencia sin cemento. Estos resultados podrían asumirse como esperables y han sido validados en otros artículos con relación al proyecto de investigación en desarrollo en el Laboratorio de Ingeniería Civil. Sin embargo, es de destacar que para el caso analizado, las tendencias indicadas no son muy marcadas, siendo los cambios en valores obtenidos con el agregado o no de cemento en el ensayo Proctor, de muy sensible variación.

En la Figura 2 se detallan para el caso de suelo sin cemento, los resultados obtenidos para las probetas ensayadas a compresión simple a densidad de humedad óptima, en rama seca, y en rama húmeda, referida a densidad del 95% de la curva Proctor.

Las designaciones de referencia adoptadas se interpretan como D1: día 1; D7: día 7; D14: día 14; D28: día 28; A: probeta A; B: probeta B; esto último dado que se hicieron probetas por duplicado.

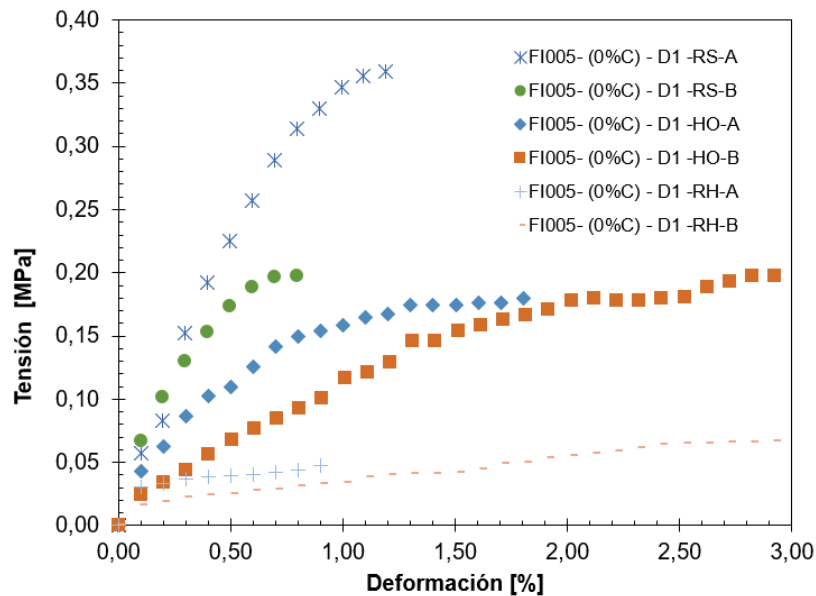


Fig. 2. Curvas tensión vs deformación de probetas de suelo sin cemento. RS: Rama Seca; HO: Humedad Óptima; RH: Rama Húmeda.

En la Figura 3, se dan las imágenes fotográficas de las probetas en rotura, es decir al finalizar el ensayo de cada una de ellas.

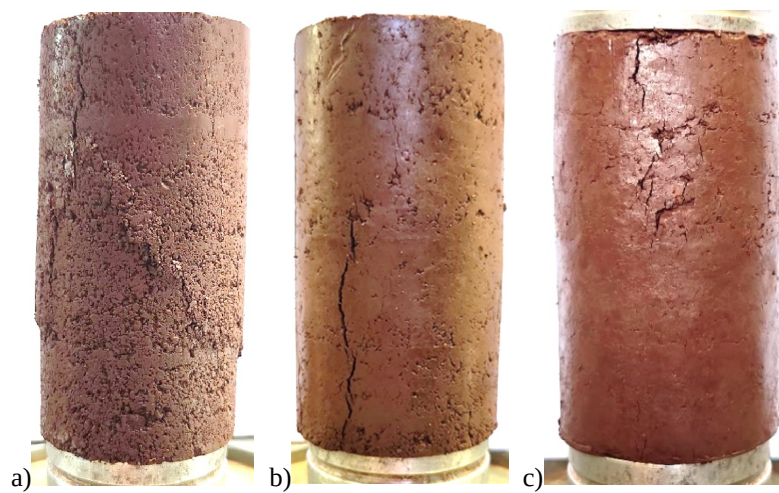


Fig. 3. Imágenes fotográficas de probetas de suelo sin cemento: a) rama seca, b) humedad óptima, y c) rama húmeda.

El análisis de los resultados de las gráficas de Figura 2 e imágenes de Figura 3 permiten identificar una diferencia clara en el tipo de rotura, dado que por ejemplo la probeta moldeada con parámetros de rama seca, presenta una resistencia alta a expensas de una mayor rigidez, y una rotura de tipo mas bien frágil; el caso de las probeta moldeada a referencias de rama húmeda, presenta resistencia baja con mínima rigidez y comportamiento tipo dúctil en la curva tensión deformación;

finalmente la probeta moldeada a humedad optima y densidad seca máxima presenta un comportamiento intermedio entre las dos anteriores.

En la Tabla 2, 3, 4, y 5 se dan los resultados de contenido de cemento, densidad seca, humedad de ensayo, resistencia a la compresión simple, y deformación de rotura para el caso de probetas diseñadas en pares para ensayo a rotura a 1, 7, 14 y 28 días, y con referencia de contenido de cemento del 4%, 6% y 8%.

En la Figura 4, 6, 8 y 10 se dan las curvas tensión deformación correspondientes a ensayo a día 1, 7, 14 y 28, indicando una tendencia a mayor resistencia con el aumento de contenido de cemento.

La Figura 5, 7, 9 y 11 permiten observar imágenes de las probetas luego de la falla, apreciándose un aumento de la fragilidad en especial si se la compara con la probeta sin cemento.

Tabla 2: Resultados de Ensayos de compresión simple para 0, 4, 6, y 8% de contenido de cemento en el suelo. Día 1.

Designación	Contenido de Cemento [%]	Densidad Seca [gr/cm ³]	Humedad de Ensayo [%]	RCS [Mpa]	Def. Rotura [%]
FI005 - (0%C) - D1	0,00%	1,469	29,02%	0,19	2,46
FI005 - (4%C) - D1	4,00%	1,465	28,19%	0,24	0,99
FI005 - (6%C) - D1	6,00%	1,519	27,30%	0,97	1,14
FI005 - (8%C) - D1	8,00%	1,535	26,42%	1,17	0,95

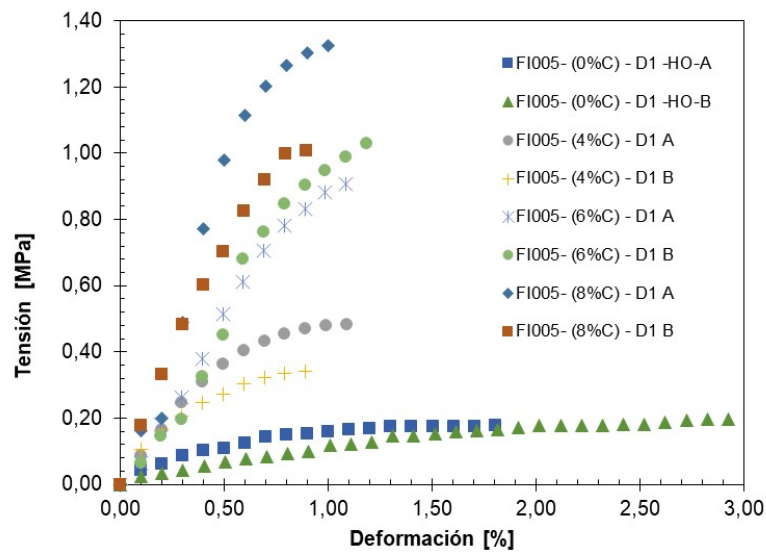


Fig. 4. Curvas tensión vs deformación de probetas ensayadas a día 1.



Fig. 5. Imágenes fotográficas de probetas ensayadas a día 1 (0%, 4%, 6% y 8% de contenido de cemento).

Tabla 3: Resultados de Ensayos de compresión simple para 0, 4, 6, y 8% de contenido de cemento en el suelo. Día 7.

Designación	Contenido de Cemento [%]	Densidad Seca [gr/cm ³]	Humedad de Ensayo [%]	RCS [Mpa]	Def. Rotura [%]
FI005 - (0%C) - D1	0,00%	1,469	29,02%	0,19	2,46
FI005 - (4%C) - D7	4,00%	1,446	28,74%	0,50	0,84
FI005 - (6%C) - D7	6,00%	1,525	26,34%	1,19	1,05
FI005 - (8%C) - D7	8,00%	1,569	26,12%	1,72	0,91

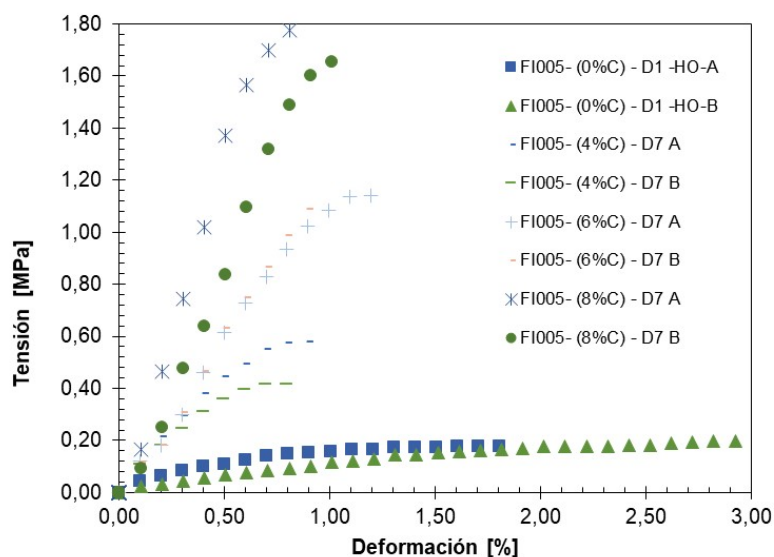


Fig. 6. Curvas tensión vs deformación de probetas ensayadas a día 7.



Fig. 7. Imágenes fotográficas de probetas ensayadas a día 7 (0%, 4%, 6% y 8% de contenido de cemento).

Tabla 4: Resultados de Ensayos de compresión simple para 0, 4, 6, y 8% de contenido de cemento en el suelo. Día 14.

Designación	Contenido de Cemento [%]	Densidad Seca [gr/cm ³]	Humedad de Ensayo [%]	RCS [Mpa]	Def. Rotura [%]
FI005 - (0%C) - D1	0,00%	1,469	29,02%	0,19	2,46
FI005 - (4%C) - D14	4,00%	1,503	27,17%	0,88	1,12
FI005 - (6%C) - D14	6,00%	1,511	26,25%	1,42	1,13
FI005 - (8%C) - D14	8,00%	1,536	25,70%	1,83	0,90

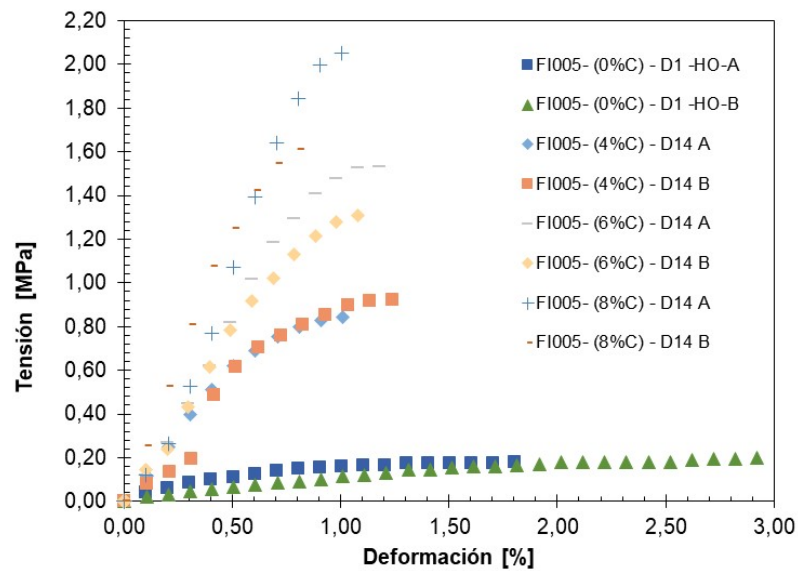


Fig. 8. Curvas tensión vs deformación de probetas ensayadas a día 14.



Fig. 9. Imágenes fotográficas de probetas ensayadas a día 14 (0%, 4%, 6% y 8% de contenido de cemento).

Tabla 5: Resultados de Ensayos de compresión simple para 0, 4, 6, y 8% de contenido de cemento en el suelo. Día 28.

Designación	Contenido de Cemento [%]	Densidad Seca [gr/cm ³]	Humedad de Ensayo [%]	RCS [Mpa]	Def. Rotura [%]
FI005 - (0%C) - D1	0,00%	1,469	29,02%	0,19	2,46
FI005 - (4%C) - D28	4,00%	1,505	28,53%	0,83	2,14
FI005 - (6%C) - D28	6,00%	1,546	25,90%	1,97	1,35
FI005 - (8%C) - D28	8,00%	1,552	25,53%	2,62	1,35

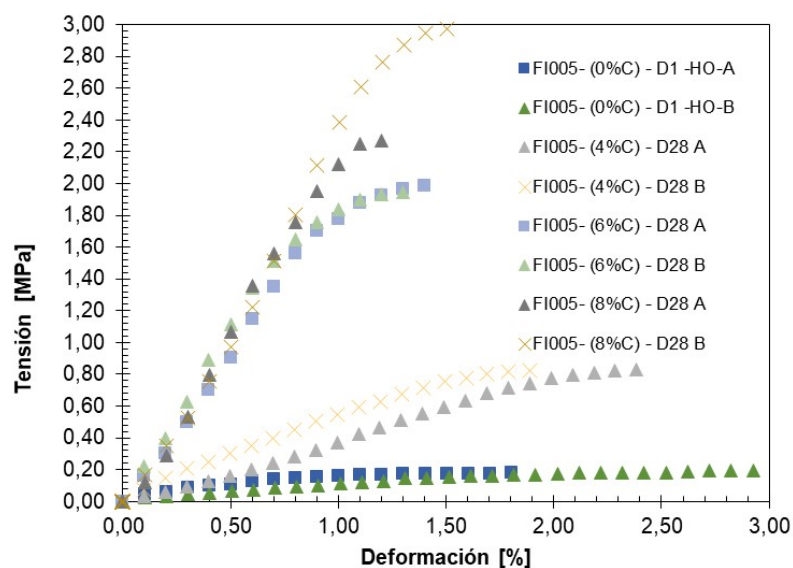


Fig. 10. Curvas tensión vs deformación de probetas ensayadas a día 28.



Fig. 11. Imágenes fotográficas de probetas ensayadas a día 28 (0%, 4%, 6% y 8% de contenido de cemento).

En la Figura 12 se dan las gráficas de Resistencia a la Compresión Simple (RCS) para las probetas ensayadas, en función del contenido de cemento y de los días de curado de estas, manteniendo como referencia inicial siempre los resultados obtenidos para suelo sin cemento.

Se verifica la tendencia a incremento de resistencia con la adición de cemento y con los días de curado. A modo de referencia si analizamos el incremento logrado a día 28, el mismo es de mas de 4 veces para 4% de cemento; mas de 10 veces para 6% de cemento; y mas de 13 veces para el caso de 8% de incorporación de cemento al suelo.

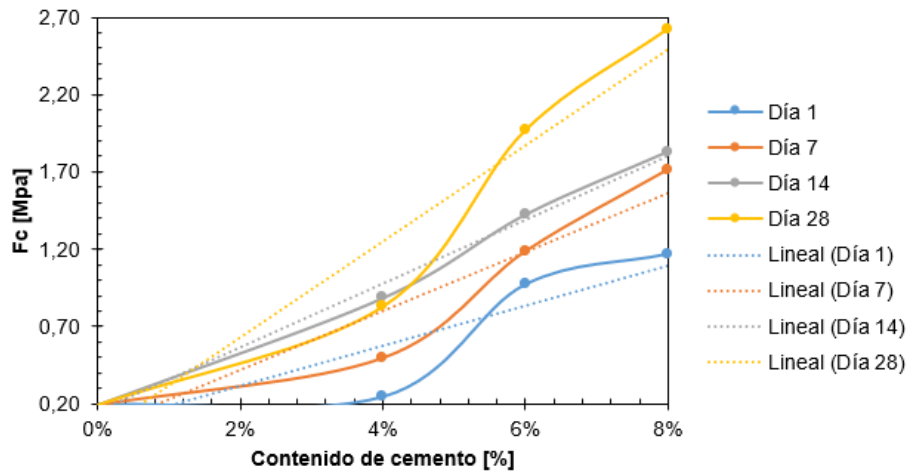


Fig. 12. Resistencia a Compresión Simple en función de los días de curado para el caso de 0%, 4%, 6% y 8% de contenido de cemento.

En la Figura 13 se dan las graficas de la deformación de rotura al momento de la falla para las probetas ensayadas, en función del contenido de cemento y de los días de curado de estas, manteniendo como referencia inicial siempre los resultados obtenidos para suelo sin cemento.

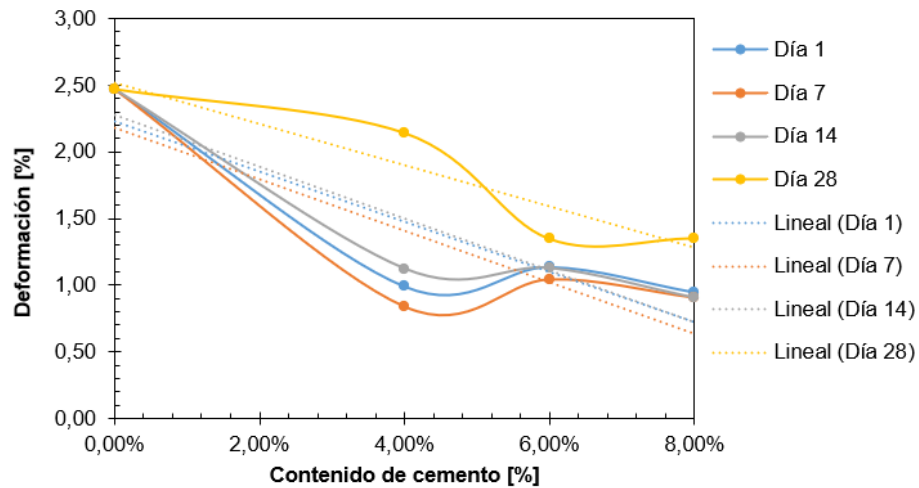


Fig. 13. Deformación de rotura en función de los días de curado para diferente contenido de cemento.

Los resultados muestran que, en una observación general del rango analizado, las deformaciones de rotura tienden a reducirse, confirmando el incremento de rigidez de las muestras y a consecuencia de ello, el comportamiento tendiente a mayor fragilidad al momento de la falla.

Tomando en cuenta la falta de información referente a los parámetros geomecánicos de las mezclas de suelos regionales con cemento, los resultados presentados resultan de mucha utilidad para describir el comportamiento y para el registro de estos, conforme se ha trabajado en artículos previos, según referencias [7], [8], [9], [10], [11] y [12].

4 Conclusiones

En el presente artículo se evaluaron las propiedades geomecánicas de muestras de suelo residual de Oberá, Misiones, con la adición de diferentes contenidos de cemento, 4%, 6% y 8% en peso. Se realizaron los ensayos Proctor de cada caso y con los resultados obtenidos el moldeo de probetas para el posterior ensayo de compresión simple a 1, 7, 14, y 28 días de curado del cemento.

Los resultados permitieron evaluar el incremento de resistencia a compresión simple de las mezclas de suelo-cemento la cual ha sido significativa, lográndose a día 28 incremento superior a 4 veces para 4% de cemento; más de 10 veces para 6% de cemento; y más de 13 veces para el caso de 8% de incorporación de cemento al suelo.

Asimismo, para el rango analizado, las deformaciones de rotura tienden a reducirse, confirmando el incremento de rigidez de las muestras y a consecuencia de ello, el comportamiento tendiente a mayor fragilidad al momento de la falla.

Se propone como continuidad de las investigaciones ampliar los ensayos de caracterización geomecánica de la mezcla suelo cemento a suelos de otros sitios de la Provincia de Misiones.

5 Agradecimientos

Se agradece la colaboración de los integrantes adscriptos al proyecto de investigación en desarrollo en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones.

6 Referencias

- [1] Norma IRAM 10501 “Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo. Índice de fluidez e índice de plasticidad”, 2007.
- [2] Norma IRAM 10507 “Método de determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda”, 1986.
- [3] Norma IRAM 10509 “Clasificación de los suelos, con propósitos ingenieriles”, 1982.
- [4] Norma IRAM 10503 “Método de determinación de la densidad relativa de los sólidos y de la

- densidad de los sólidos de un suelo”, 2007.
- [5] Norma IRAM 10511 “Método de ensayo de compactación en laboratorio”, 1972.
- [6] Norma VN-E20-66 “Determinación de dosaje para ensayar mezclas de suelo-cemento”, 1966.
- [7] Horn Jonatan; Drewes Mario; Alvez Angela; Rey Leyes Samiara; Villalba Castillo Florencia; Pintos Nicolás Agustín; Hugo Reinert; Bogado Gustavo (2022). Análisis de resultados en ensayos de compactación para mezclas suelo-cemento. Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión y Vinculación. Oberá Misiones.Vol1-Año 2022-ISSN 2591-4219.
- [8] Drewes, Mario; Bogado, Gustavo O.; Horn, Jonatan R.; Bressan, Daniel A.; Pintos, Nicolás A.; Reinert, Hugo O. (2022). Variación de la resistencia a la compresión simple en muestras de suelo cemento. Salão do Conhecimento, 5(5). XXX Seminário de Iniciação Científica - Salão do Conhecimento 2022, Brasil. ISSN 2318-2385.
- [9] Bogado, Gustavo. O.; Reinert, Hugo. O.; Drewes, Mario; Francisca Franco M. (2023). Influencia del porcentaje de cemento en el comportamiento físico-mecánico inicial de suelos lateríticos de Misiones. XXVI Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Comodoro Rivadavia, Argentina.
- [10] Bogado Gustavo. O., Reinert Hugo. O., Drewes Mario, Rey Leyes Samira R., Posnik Nahuel D., Drewes Ingrid B. (2023). Evaluación de resultados de ensayos de compresión simple en mezclas de suelo cemento para su utilización en ladrillos ecológicos en Misiones, Argentina. XIII Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión y Vinculación. Oberá Misiones.Vol1-Año 2023-ISSN 2591-4219.
- [11] Bogado Gustavo O., Reinert Hugo O., Neudeck Néstor H. (2023). Evaluación de propiedades elásticas de muestras de suelo-cemento mediante emisión acústica. XIII Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión y Vinculación. Oberá Misiones.Vol1-Año 2022-ISSN 2591-4219.
- [12] Korpys Camila, Drewes Mario, Gauna Daiana, Pettersen Julieta, Escribano Mariel (2024). Variación de la resistencia a la compresión simple en suelos residuales con adición de cemento portland normal. XIV Jornadas de Investigación, Desarrollo Tecnológico, Extensión y Vinculación. Oberá Misiones.Vol1-Año 2023-ISSN 2591-4219.