

## Variación de la resistencia a la compresión simple en suelos residuales con adición de cemento portland normal

Camila Korpys<sup>a\*</sup>, Drewes Mario<sup>a</sup>, Gauna Diana<sup>a</sup>, Pettersen Julieta<sup>a</sup>, Escribano Mariel<sup>a</sup>,

<sup>a</sup> Universidad Nacional de Misiones, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ingeniería Civil, Oberá, Misiones, Argentina.

e-mails: camila.korpys@fio.unam.edu.ar, mariodrewes98@gmail.com, gaunadiana@gmail.com, pettersenjulieta1@gmail.com, marielescri@gmail.com

---

### Resumen

En el presente artículo se evalúan las propiedades geomecánicas de muestras de suelo residual y mezclas de suelo con cemento, en probetas de 49 milímetros de diámetro y 100 milímetros de altura. Se moldearon y ensayaron probetas a Humedad Óptima y Densidad Seca Máxima alcanzada en cada uno de los ensayos Proctor realizados, con 0%, 2%, y 4% de incorporación de cemento en peso. Asimismo, se analizaron ensayos de humedad y densidad de referencia para el caso del suelo sin cemento, considerado al 95% de densidad seca máxima y humedades correspondientes en rama seca y rama húmeda. Se realizaron ensayos de compresión simple para la definición de resistencia, así como también la medición de Módulo de Elasticidad inicial y su variación en el tiempo, a fin de evaluar 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 guarismos de resistencia, así como el aumento de la rigidez del suelo, conforme el aumento de los días de curado.

*Palabras Clave* –Suelos residuales, Suelo cemento, Resistencia a la Compresión Simple, Modulo de Elasticidad

### 1 Introducción

Desde la óptica de los procesos de formación, los suelos regionales se denominan residuales debido al propio origen, dado que el material (suelo) proviene de la meteorización de la roca matriz y no ha sido transportado desde su localización original.

En los diferentes usos del suelo como elemento de construcción, el mismo puede ser transportado por medios mecánicos a sitios diferentes, pero al hacerlo en estos términos, el mismo requiere mecanismos de compactación o mejora que le otorgan nuevas propiedades geomecánicas dada la incorporación de energía para su mejoramiento.

Los suelos residuales de la región bajo el análisis del sistema unificado de clasificación de suelos responden por lo general a ML o MH (limos arcillosos de baja o alta plasticidad), mientras que para el sistema de clasificación HRB (Highway Research Board) estos suelos se clasifican por lo general como A-5, A-6 o A-7.

Las referencias bibliográficas, y en particular la Norma de Ensayo VN-E20-66 indica que para el caso de estos suelos el porcentaje en peso de cemento a incorporar al suelo para su empleo en obras como elemento compactado, debe ser próximo al 13%, valor que resulta algo elevado al momento de analizar los costos asociados.

\* camila.korpys@fio.unam.edu.ar

En el presente trabajo, se realizan ensayos para la determinación de la respuesta del suelo en estudio cuando se lo trabaja con las referencias del ensayo Proctor Normal, a contenidos de cemento del 0%, 2% y 4%. Los resultados obtenidos de resistencia a compresión simple permiten obtener no solo el estado tensional máximo, sino también la rigidez que presenta el material en su trayecto hasta la rotura, teniendo en cuenta los días de curado del cemento, 1, 7, 14, y 28 días.

## 2 Metodología

La muestra de suelo empleada en el presente trabajo ha sido tomada de la zona centro de la provincia de Misiones, concretamente en la Ciudad de Oberá (-27.472498, -55.085881). Fue trasladada en condiciones adecuadas para su almacenamiento y conservación en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería donde se procedió a realizar los ensayos planificados.

Dado el exceso de humedad natural de la muestra, se dispuso para el secado al aire durante un período prudencial, en general del orden de una semana. Luego, se realizó el cribado por tamiz N° 4, seguidamente se almacenó en bolsas plásticas adecuadamente identificadas.

Para caracterizar el suelo se realizaron los siguientes ensayos: Límites de Atterberg (IRAM 10501-2007) [1], granulometría por tamizado vía húmeda (IRAM 10507-1986) [2], clasificación de suelos (IRAM 10509-1982) [3], así como la determinación de gravedad específica (IRAM 10503-2007) [4].

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

Con los datos de la caracterización y de los ensayos Proctor definidos para el 0%, 2% y 4% de cemento, se planificaron la secuencia de probetas a moldear para los sucesivos ensayos de compresión simple. Se preparó material suficiente 24 hs previas al moldeo para su correcta maceración. Para el moldeo de 6 probetas en el caso del 0% (3kg) y de 8 probetas en el caso del 2% (4kg) y 4% de cemento (4kg).

Para el caso de las muestras de puntos en que se incorpora cemento, esto se realiza inmediatamente antes del moldeo, realizando la mezcla correspondiente conforme la dosificación en peso determinada para cada caso utilizando de dato la humedad obtenida durante la preparación de las muestras.

En cuanto al procedimiento de compactación, el mismo se realiza en cuatro capas distribuidas en 25mm cada una, donde se hace entrar el peso de suelo acondicionado a humedad de referencia para alcanzar la densidad deseada. Para el 0% de cemento se moldearon tomando como referencia la humedad óptima y su densidad seca máxima, 2 probetas. En rama seca y al 95% de la densidad máxima otras 2 probetas y en rama húmeda otras 2 probetas. Las 8 probetas del 2% y del 4% se moldearon a humedad óptima y densidad seca máxima.

En la Figura 1 se muestra el proceso de incorporación de agua mediante el rociador (a) y el correspondiente mesclado (b), así como la compactación de la probeta para compresión simple en el molde correspondiente (c). Finalmente se observa una probeta ensayada (d) a los fines de identificar el resultado.



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

### 3 Presentación y Análisis de Resultados

Se desarrollaron ensayos de caracterización, límites de consistencia, granulometría por lavado tamiz 200 y gravedad específica, para el caso de suelo en condiciones naturales, sin cemento, presentándose en Tabla 1 los resultados correspondientes.

En la misma Tabla se detalla además la clasificación alcanzada en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, donde se identifica como Limo de baja plasticidad (ML), mientras que en el sistema de Clasificación del HRB se caracteriza como A-5.

**Tabla 1:** Resultados de Ensayos de Caracterización suelo natural (Sin cemento)

Muestra	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)	Pasa Tamiz 200 (%)	Gravedad Específica (-)	Clasificación SUCS	Clasificación HRB
<b>Suelo Natural</b>	47.25	37.45	9.80	98.80	2.83	ML	A-5

En la Tabla 2 se presenta a modo de resumen los resultados obtenidos de Humedad Óptima (HO) y Densidad Seca Máxima alcanzada (DSmax) de cada uno de los ensayos Proctor realizados, con 0%, 2%, y 4% de incorporación de cemento en peso. Asimismo, se presentan los resultados de humedad

y densidad de referencia para el caso del suelo sin cemento, considerado al 95% de densidad seca máxima y humedades correspondientes (RS: rama seca; RH: rama húmeda).

**Tabla 2:** Resultados de Ensayos Proctor Método Normal (SS: Suelo Solo; SC: Suelo Cemento)

Muestra	SS-0%	SS-0%	SS-0%	SC-2%	SC-4%
RS [%]	31.15	-	-	-	-
HO [%]	-	34.70	-	33.20	33.00
RH [%]	-	-	38.62	-	-
DSmax [gr/cm <sup>3</sup> ]	1.305	1.374	1.305	1.402	1.395

En análisis denota 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 en relación al proyecto de investigación.

En la Tabla 3 para el caso de suelo sin cemento, se detallan los resultados obtenidos para las probetas moldeadas para compresión simple a humedad óptima y en rama seca y húmeda referida densidad de referencia del 95% del Proctor. Se dan los resultados de humedad de moldeo, resistencia alcanzada, y módulo de elasticidad inicial para cada par de probetas ensayadas.

**Tabla 3:** Resultados de Ensayos de compresión simple suelo sin cemento.

Designación	Humedad de Diseño [%]	Densidad Seca [gr/cm <sup>3</sup> ]	Humedad de Ensayo [%]	RCS [Mpa]	E0 [Mpa]
FI004- (0%C) - D1 -RS-A	31,15%	1,305	30,87%	0,40	43,65
FI004- (0%C) - D1 -RS-B	31,15%	1,305	30,84%	0,40	44,05
FI004- (0%C) - D1 -HO-A	34,70%	1,374	35,04%	0,24	11,18
FI004- (0%C) - D1 -HO-B	34,70%	1,374	34,81%	0,23	10,45
FI004- (0%C) - D1 -RH-A	38,62%	1,305	38,33%	0,05	2,61
FI004- (0%C) - D1 -RH-B	38,62%	1,305	38,52%	0,11	3,45

En la Figura 2 se presentan las curvas carga versus deformación obtenidas para los 6 ensayos realizados, con las muestras de suelo natural moldeadas sin contenido de cemento, verificando respuesta de probetas elaboradas a humedad de rama seca, humedad óptima, y humedad de rama húmeda.

El procesamiento de los resultados permite obtener mediante el trazado de las curvas de tensión-deformación, los módulos de elasticidad al inicio del ensayo (E0), y la respectiva resistencia a la compresión simple (RCS) para cada caso, valores informados en Tabla 3.

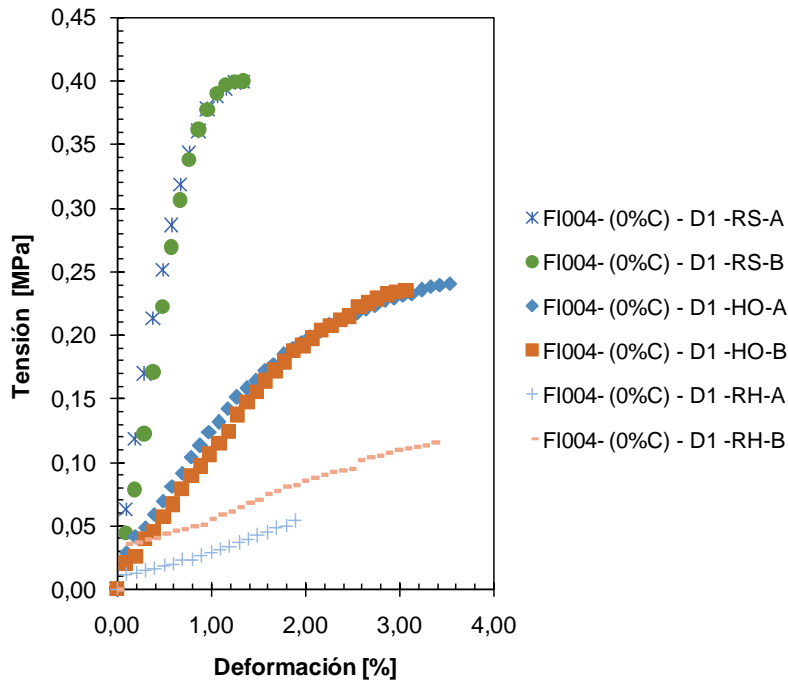


Fig. 2. Curva carga vs deformación de probetas ensayadas.

En líneas generales se observa que el módulo de elasticidad inicial en probetas duplicadas presenta una pequeña variación en sus resultados, sin embargo, la resistencia a la compresión simple es similar en ambas probetas para el caso de humedad de rama seca y óptima, presentado diferencias para el caso de probetas en humedad de rama húmeda.

Como es de esperarse para el caso de suelo sin cemento, se pasa de mayor a menor resistencia, y de mayor a menor módulo de elasticidad a medida que se avanza con el contenido de humedad de moldeo, es decir:  $\underline{RS (E0 \text{ y } RCS)} > \underline{HO (E0 \text{ y } RCS)} > \underline{RH (E0 \text{ y } RCS)}$ , tal como se aprecia en Figura 2 y Tabla 3.

En la Figura 3 se presentan las curvas carga versus deformación obtenidas para los 18 ensayos con probetas moldeadas a humedad óptima, 2 de suelo sin cemento, 8 de suelo con 2% de cemento, 8 con suelo con 4% de cemento, realizando los ensayos de la misma en pares en día 1, 7, 14 y 28 desde su moldeo, a fin de evaluar el efecto del cemento con los días de curado.

Las designaciones de referencia adoptadas se interpretan como D1A, día 1, probeta A; D1B, día 1, probeta B; y así con las demás probetas en la secuencia de días planificados.

En la Tabla 4 y 5 se dan los resultados de humedad de diseño, humedad de ensayo, resistencia a la compresión simple, y módulo elástico inicial de probetas diseñadas en pares para rotura a 1, 7, 14 y 28 días, y con referencia de contenido de cemento del 2% y del 4%.

En la Tabla 6 se presenta el análisis de resultados de módulo elástico inicial promedio de cada par de probetas para el caso de suelo sin cemento moldeado a humedad óptima, y suelo con 2% y 4% de cemento a humedad óptima del Proctor correspondiente.

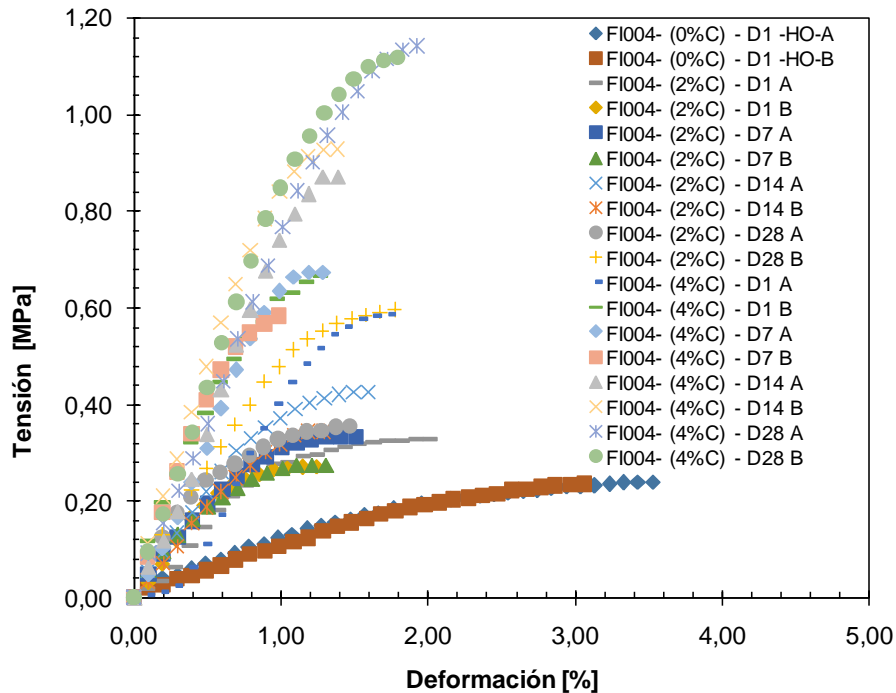


Fig. 3. Curva carga vs deformación de probetas ensayadas (0%C, 2%C, 4%C).

El análisis de los mismos se puede apreciar en Figuras 4 y 5, en las que se aprecia la tendencia de crecimiento lineal de lo propuesto con los días de curado.

En la Figura 4 se observa que, para una referencia inicial de tensión máxima relacionada a la resistencia a la compresión simple para el caso de suelo sin cemento, con la adición de 2% de cemento se logra una mejora en la resistencia para el tiempo inicial (día 1), la cual se duplica con la adición de 4% de cemento.

A partir de allí, si se analiza la evolución de la resistencia con los días de curado del cemento, entendiendo esto como el ensayo de resistencia a compresión simple en días posteriores de probetas moldeadas a tal fin, se obtiene un incremento en los valores de rotura los cuales son de consideración.

Tabla 4: Resultados de Ensayos de compresión simple Suelo con 2% de cemento a 1, 7, 14, y 28 días.

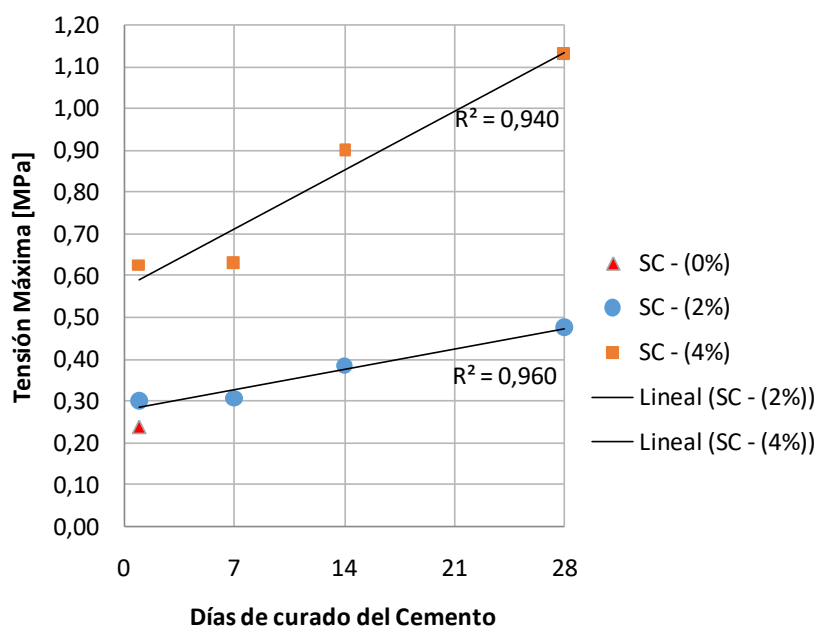
Designación	Humedad de Diseño [%]	Humedad de Ensayo[%]	RCS [Mpa]	E0 [Mpa]
FI004- (2%C) - D1 A	33,20%	33,77%	0,33	30,88
FI004- (2%C) - D1 B	33,20%	33,68%	0,27	39,21
FI004- (2%C) - D7 A	33,20%	33,46%	0,33	34,42
FI004- (2%C) - D7 B	33,20%	33,81%	0,28	34,79
FI004- (2%C) - D14 A	33,20%	33,33%	0,43	42,66
FI004- (2%C) - D14 B	33,20%	33,37%	0,34	36,06
FI004- (2%C) - D28 A	33,20%	33,13%	0,35	43,27
FI004- (2%C) - D28 B	33,20%	32,96%	0,60	47,06

**Tabla 5:** Resultados de Ensayos de compresión simple Suelo con 4% de cemento a 1, 7, 14, y 28 días.

Designación	Humedad de Diseño [%]	Humedad de Ensayo [%]	RCS [Mpa]	E0 [Mpa]
FI004- (4%C) - D1 A	33,00%	33,26%	0,59	50,09
FI004- (4%C) - D1 B	33,00%	32,83%	0,67	66,05
FI004- (4%C) - D7 A	33,00%	32,81%	0,67	68,22
FI004- (4%C) - D7 B	33,00%	32,91%	0,58	81,42
FI004- (4%C) - D14 A	33,00%	32,89%	0,87	72,92
FI004- (4%C) - D14 B	33,00%	32,74%	0,93	86,83
FI004- (4%C) - D28 A	33,00%	32,25%	1,14	71,80
FI004- (4%C) - D28 B	33,00%	32,04%	1,12	83,14

**Tabla 6:** Módulo elástico promedio de cada par de probetas. Con 0%, 2% y 4% de cemento y a 1, 7, 14, y 28 días.

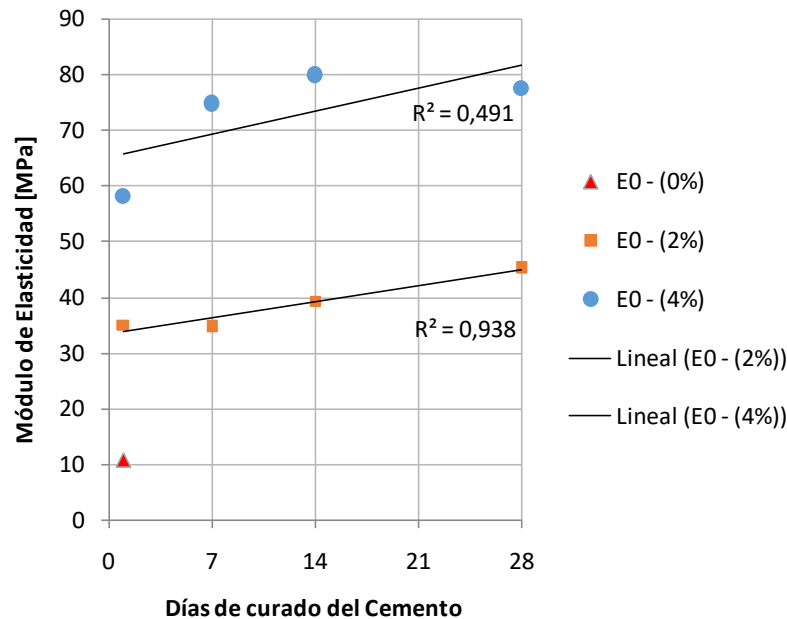
Designación	E0 [Mpa]			
	1	7	14	28
FI004-(0%)	10,81	-	-	-
FI004-(2%)	35,05	34,60	39,36	45,17
FI004-(4%)	58,07	74,82	79,88	77,47



**Fig. 4.** Variación de tensión máxima alcanzada vs días de curado, y contenido de cemento incorporado.

En la Figura 5 se observa que, para una referencia inicial de módulo elástico relacionada a la resistencia a la compresión simple para el caso de suelo sin cemento, con la adición de 2% de cemento se obtiene un aumento del módulo elástico para el tiempo inicial (día 1), la cual aumenta considerablemente con la adición de 4% de cemento.

El análisis de estos resultados indica que la media entre probetas duplicadas para 1, 7, 14, y 28 días, es claramente tendiente al aumento del módulo de elasticidad inicial conforme los días de curado, lo cual es esperable dado el aumento de la fragilidad del material por efectos de la acción del cemento en el suelo. Esta fragilidad se manifiesta aún más para contenidos de cemento más elevados, razón por la cual se estima se produce la mayor dispersión en los resultados para el caso del 4% respecto del 2%, con el menor ajuste observado en el  $R^2$ .



**Fig. 5. Variación del Módulo de Elasticidad Inicial vs días de curado, y contenido de cemento incorporado.**

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 los mismos [7], [8], [9], [10], [11].

Como continuidad de las investigaciones, se ha de trabajar en ampliar el número de ensayos realizados, evaluando la respuesta del suelo cemento con la incorporación de mayor contenido de cemento en la mezcla.

#### 4 Conclusiones

En este artículo se evaluaron las propiedades de muestra de suelo residual natural y mejorado con 2% y 4% de cemento, definiendo la resistencia a la compresión simple y la variación del módulo de elasticidad de probetas de suelo cemento a 1, 7, 14, y 28 días de curado.

Los resultados permitieron identificar el efecto de la mejora lograda en los guarismos de resistencia con la incorporación de cemento a las muestras de suelo, así como el aumento de la rigidez de la mezcla conforme el incremento de los días de curado.



Se propone como continuidad de las investigaciones incrementar el contenido de cemento y 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.