

Análisis de los parámetros resistentes de Suelos Lateríticos Regionales conforme energía de compactación aplicada y humedad óptima de referencia

Bleeh Santiago R.*^a; Drewes Mario^a; Drewes Ingrid B.^b; Burtnik Anahí B.^a; Amores Emilia^a; Ebert Lucas^a; Reinert Hugo O.^c; Pintos Nicolás A.^d; Bogado Gustavo O.^d; Bressan Daniel A.^e

^a*Estudiante de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^b*Integrante del Proyecto, Becario de Grado, Estudiante de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.,*

^c*Co-director del Proyecto, Docente Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), Oberá, Misiones, Argentina,*

^d*Integrante del Proyecto, Docente Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

^e*Director del Proyecto, Docente Departamento de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

E-mails: blechsanti@gmail.com, ingridbdrewes@gmail.com, mariodrewes98@gmail.com.ar, reinert@fio.unam.edu.ar, nicolasagustinpintos@gmail.com.ar, gustavobogado@fio.unam.edu.ar, bressanobe@gmail.com

Resumen

En el presente trabajo se exponen los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio y su análisis como parte del Proyecto de Investigación Código 016 / 1145, con el objetivo de establecer el comportamiento de los parámetros resistentes de los suelos residuales regionales remoldeados a distintas energías de compactación. Se analizan las variaciones de la Cohesión y el Ángulo de Fricción Interna con relación a la Humedad de ensayo. Para ello se estudiaron 16 muestras de suelo de diferentes sitios de la Provincia de Misiones, sobre las cuales se realizaron ensayos de caracterización (Límites de Atterberg, Granulometría, Clasificación), Ensayos Próctor Normal y Normal Alternativa B, y Ensayos en Cámara Triaxial siguiendo los lineamientos especificados en las Normas IRAM. Se obtuvieron curvas representativas del comportamiento de los parámetros resistentes en función de la humedad óptima y su energía de compactación característica. Dichos datos son de utilidad para estimar la capacidad de carga de los suelos y con ello poder establecer criterios sobre los usos de los mismos en obras civiles. Se prevé incrementar el número de rutinas de ensayos a fin de contrastar o comprobar lo presentado.

Palabras Clave –ángulo de fricción interna, cohesión, ensayo triaxial, ensayo Próctor, humedad óptima.

1. Introducción

Teniendo en cuenta la baja disponibilidad de datos que logren caracterizar al suelo presente en la mayor parte de Misiones, una zona de Corrientes, y parte de Brasil y Paraguay, se ha trabajado en la obtención de una nube de datos con la cual establecer conclusiones en cuanto al comportamiento de este suelo característico.

Estos suelos provienen de la meteorización del basalto subyacente en la región, por lo que se los denomina residuales, y debido a sus características particulares, también se lo llama laterítico.

La necesidad de determinación de los parámetros resistentes o característicos, nace a partir de observar incongruencias respecto del comportamiento entre lo establecido en las distintas normativas vigentes en el país, y lo observado en la experiencia y en estudios realizados con anterioridad. Además, las distintas clasificaciones y caracterizaciones a nivel mundial, por ejemplo, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el Highway Research Board (HRB) clasifican a este suelo como “Regular a Malo”, no correspondiéndose a lo observado en los resultados producto de la utilización de éstos en obras civiles existentes hace varios años.

Teniendo en cuenta esto, es fundamental lograr la caracterización de estas variables, ya que en todas las obras civiles el suelo es utilizado como material involucrado, o bien se constituye como el material sobre el cual se fundan las obras.

En este sentido, ya se viene trabajando en la temática, y los resultados obtenidos se han publicado en eventos precedentes [1, 2, 3],

En el presente trabajo se exhiben resultados de ensayos triaxiales no consolidados no drenados a humedad de moldeo, correspondientes a los puntos del ensayo Próctor normal y Próctor normal alternativa B [4], de distintas muestras extraídas en el territorio de la Provincia de Misiones, específicamente en zonas aledañas o internas a la Ciudad de Oberá.

A partir de éstos se quiere establecer conclusiones respecto de los parámetros resistentes del suelo, como ser la Cohesión y el Ángulo de Fricción Interna, en función de la variación de la Humedad del mismo, lo que puede resultar útil para entender los comportamientos del suelo colorado característico de la región.

2. Metodología

El estudio se desarrolla sobre muestras de suelo obtenidas por integrantes del equipo de investigación, o bien entregadas en el laboratorio por empresas externas de la Facultad de Ingeniería de la ciudad de Oberá. Se han realizado los ensayos pertinentes sobre 16 muestras de los sitios indicados en la Tabla 1.

Cada rutina de ensayo comprende distintos ensayos individuales, como la granulometría por tamizado vía húmeda [5], límites de Atterberg [6], y Clasificación de Suelos [7], los cuales se resumen en la Tabla 2; luego, los ensayos Próctor normal (tipo I) y normal alternativa B (tipo III) donde se realizan 5 probetas por cada muestra y se obtienen valores de densidad seca para cada valor de humedad (o para cada punto), para el posterior ensayo en cámara triaxial [8], y en caso de algún incidente o imprevisto, se incluye un remoldeo de la probeta para este punto específico.

Tabla 1. Localización de los sitios de toma de muestras utilizadas.

Designación	Dirección Aproximada	Coordenadas	Municipio
FI001	Calle Ferradás, Leandro N. Alem	-27.595180, -55.324773	Leandro N. Alem
FI003	Ruta Provincial N°5, Estación Transformadora	-27.657771, -54.991350	Panambí
FI005	Ruta Nacional N°14, Estación Transformadora	-27.447322, -55.083106	Oberá
FI006	Ruta Nacional N°14, Pasando Guaraní	-27.521616, -55.175917	Guaraní
FI007	Esquina calle Jujuy y Berutti	-27.482532, -55.123057	Oberá
FI008	Calle Carhué casi Ushuaia	-27.485849, -55.107659	Oberá
FI010	Ruta Nacional N°14, Predio DINI	-27.474952, -55.085938	Oberá
FI011	El Chachi. Calle Santo Chaves	-27.476834, -55.090665	Oberá
FI012	Ruta Nacional N°14, Pasando Termas	-27.463124, -55.086487	Oberá
FI013	Parque de las Naciones, Humboldt	-27.495880, -55.109928	Oberá
FI014	Itaembé Guazú, Lazarte	-	Posadas
FI015	Ruta Nacional N°14, casi calle Montevideo	-27.505436, -55.121510	Oberá
FI016	Av. Picada Vieja y A° Uruguai	-27.469816, -55.106436	Oberá
FI017	Calle Canal Torto	-27.468979, -55.109719	Oberá
30298	Mz. N° 135 PROCREAR, It. Guazú	-	Posadas
30193	Yacimiento Vaccel, Santa Ana	-	Santa Ana

Las probetas resultantes del ensayo Próctor normal y normal alternativa B, son talladas y se procede a ensayarlas inmediatamente en cámara triaxial, para preservar la humedad de la misma. En caso de no ser posible, las mismas se almacenan en envoltorios para su posterior colocación en una cámara húmeda.

Una vez que se ha decidido ensayar la probeta, se procede a llevar adelante el ensayo para la obtención de los valores de cohesión y ángulo de fricción interna correspondiente, y se determina la humedad de ésta al momento de la realización del ensayo.

A diferencia de lo establecido en la norma, se realiza una sola probeta por cada punto para el ensayo triaxial, es decir se realiza el ensayo escalonado a la humedad a la que se encuentra la probeta. Se ha establecido esta rutina diferenciada con el fin de lograr comprender el comportamiento mecánico del suelo lo más próximo a cómo se encuentra en campo.

Una vez que se determinan los parámetros resistentes de cada punto de la muestra, se procede a realizar curvas que representen la variación de la cohesión y ángulo de fricción interna en función de una normalización de la humedad de la misma, en función de la humedad óptima característica de cada suelo y a la correspondiente energía de compactación empleada. Estas gráficas se presentan en las Figuras 1, 2, 3 y 4.

3. Presentación y Análisis de Resultados

En la Figura 1 se presenta la gráfica de la variación de la Cohesión con la humedad normalizada respecto de la óptima, mientras que en la Figura 2 se da la variación del Ángulo de Fricción Interna con la humedad normalizada respecto de la óptima, ambos para la energía asociada al ensayo Próctor Tipo I.

Tabla 2. Resumen de resultados obtenidos en laboratorio de muestras ensayadas.

Muestra	L.L. [%]	L.P. [%]	I.P. [%]	Clasificación según SUCS	% de suelo que pasa tamiz 200 [%]	Próctor Tipo	Peso Unitario Seco Máximo [kN/m ³]	Humedad óptima [%]
FI001	54,20	40,52	13,69	MH	95,00	I	14,33	30,5
						III	14,85	30,0
FI003	53,01	35,16	17,85	MH	92,72	I	14,50	28,4
						III	14,80	27,4
FI005	50,80	38,10	12,70	MH	93,81	I	14,99	29,4
						III	15,44	27,5
FI006	66,16	44,80	21,36	MH	-	I	15,09	25,3
						III	15,58	23,8
FI007	66,28	49,51	16,76	MH	96,59	I	13,72	32,7
						III	14,21	32,0
FI008	57,33	45,76	11,57	MH	94,23	I	13,45	34,5
						III	13,62	33,0
FI010	49,45	35,15	14,30	ML	96,75	I	14,50	29,0
						III	14,80	28,0
FI011	56,98	44,60	12,37	MH	96,72	I	13,62	32,5
						III	13,92	31,5
FI012	79,15	51,90	27,24	MH	99,25	I	13,13	37,0
						III	13,52	35,0
FI013	76,18	41,26	34,91	MH	99,02	I	14,01	31,5
						III	14,80	31,0
FI014	47,46	35,54	11,92	ML	88,28	I	14,90	27,5
						III	15,19	26,0
FI015	56,31	43,51	12,80	MH	96,25	I	13,92	32,0
						III	14,11	30,5
FI016	63,06	44,22	18,84	MH	97,00	I	13,67	33,0
						III	14,30	31,2
FI017	55,17	38,37	16,80	MH	96,76	I	13,77	31,7
						III	14,27	31,1
30193	59,57	43,90	15,67	MH	88,40	I	14,10	32,9
						III	-	-
30298	49,88	35,50	14,38	ML	87,90	I	14,76	26,6
						III	-	-

De igual manera en la Figura 3 se presenta la gráfica de la variación de la Cohesión con la humedad normalizada respecto de la óptima, mientras que en la Figura 4 se da la variación del Ángulo de Fricción Interna con la humedad normalizada respecto de la óptima, ambos para la energía asociada al ensayo Próctor Tipo III.

Para el análisis de los resultados obtenidos se ha definido para el parámetro adimensional W/W^* , un rango de variación de entre 0,79 a 1,22 para el Próctor normal, y entre 0,81 a 1,17 para el Próctor normal alternativa B, dado que responden al entorno de interés de análisis. Este parámetro W/W^* representa la normalización de la Humedad de la muestra (probeta) de suelo respecto de la Humedad Óptima a determinada energía de compactación, siendo W [%] la humedad de moldeo del suelo y W^* [%] la humedad óptima del suelo correspondiente a la muestra analizada.

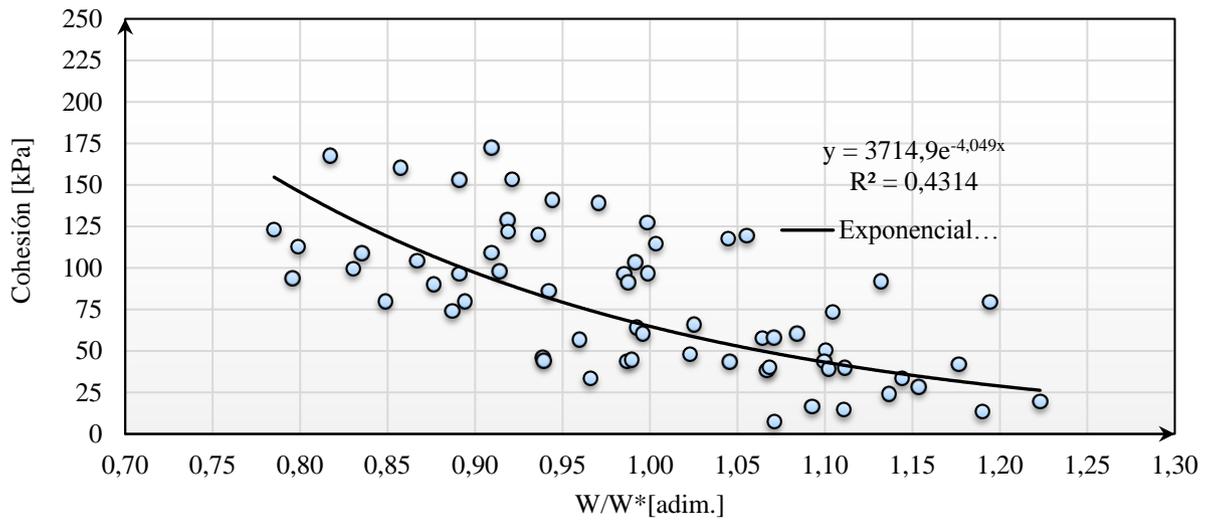


Figura 1. Gráfica de Cohesión vs. W/W* para Próctor Normal (Tipo I).

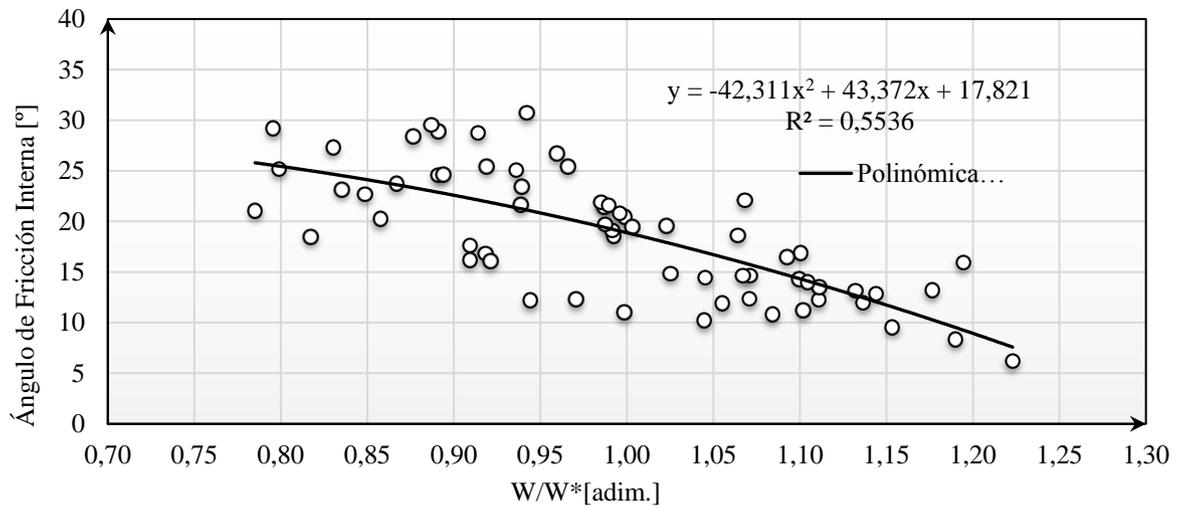


Figura 2. Gráfica de Ángulo de Fricción Interna vs. W/W* para Próctor Normal (Tipo I).

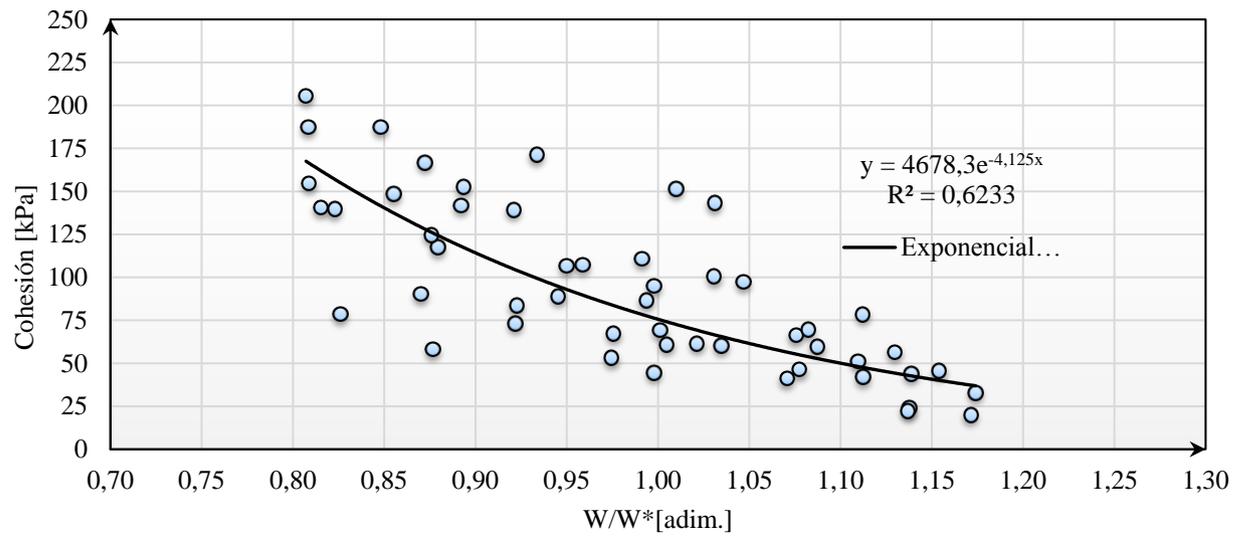


Figura 3. Gráfica de Cohesión vs. W/W* para Próctor normal alternativa B (Tipo III).

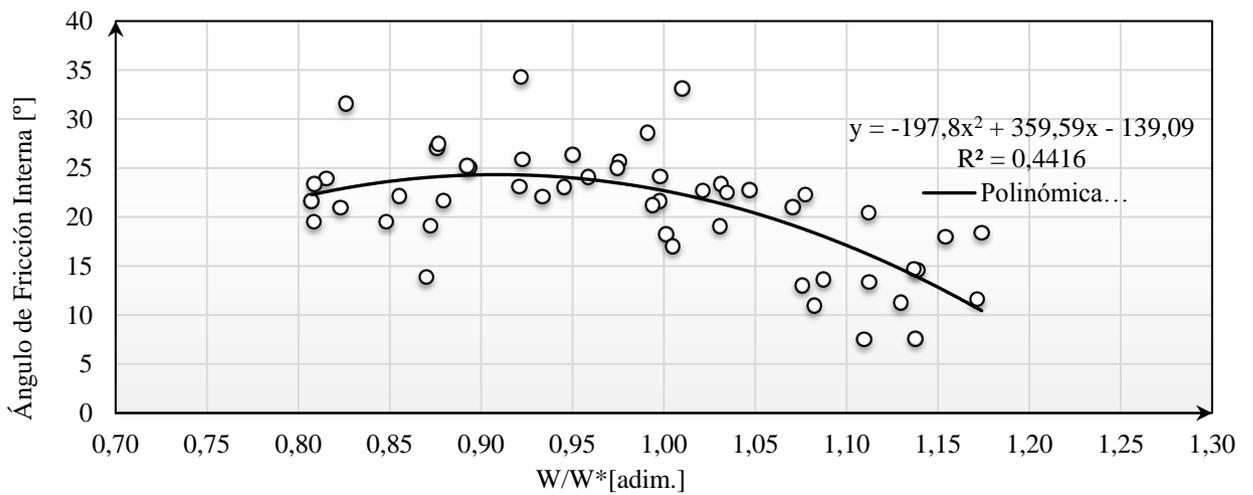


Figura4. Gráfica de Ángulo de Fricción Interna vs. W/W* para Próctor normal alternativa B (Tipo III).

En la Figura 1 y Figura 3, se puede visualizar la variación de la Cohesión en función del parámetro adimensional relacionado al estado de humedad del suelo, observándose una tendencia al decrecimiento exponencial del parámetro resistente a medida que aumenta la humedad de moldeo respecto de la óptima, es decir, el aumento del cociente W/W^* .

Para el caso del Próctor Normal, la ecuación (1) es la de referencia, alcanzándose un ajuste R^2 de 0.431; mientras que para el Próctor Normal alternativa B, la ecuación (2) es la de referencia, presentando un ajuste R^2 de 0.623.

$$C_{(PI)} = 3714.9 e^{-4.049 \left(\frac{W}{W^*}\right)} \quad (1)$$

$$C_{(PIII)} = 4678.3 e^{-4.125 \left(\frac{W}{W^*}\right)} \quad (2)$$

Siendo C la cohesión expresado en [kPa]. Al comparar los resultados de ambas gráficas, se puede destacar el hecho de que los valores de Cohesión, a medida que aumenta la Energía de Compactación, son numéricamente superiores. Así, para un Próctor Normal (Tipo I) el valor de Cohesión esperado a la Humedad Óptima tiene valores medios de **64.8 kPa** mientras que para el Próctor Normal Alternativa B (Tipo III) ese valor es de **75.6 kPa**.

En la Figura 2 y Figura 4 se presentan las variaciones del Ángulo de Fricción Interna en función del parámetro adimensional relacionado al estado de humedad del suelo, observándose un comportamiento similar al detallado para la Cohesión, pero con diferencias en el comportamiento de los valores medios, aproximándose éstos a una variación polinómica de grado 2.

En el caso de la Figura 2, para el caso del Próctor Tipo I la tendencia es siempre decreciente con el aumento de la humedad del suelo, mientras que para el caso del Próctor Normal Alternativa B se da un pequeño crecimiento inicial, hasta alcanzar el valor de W/W^* igual a 0,91, y luego cambia a una tendencia decreciente.

Para el caso del Próctor Normal, la ecuación (3) es la de referencia, alcanzándose un ajuste R^2 de 0.553; mientras que para el Próctor Normal alternativa B, la ecuación (4) es la de referencia, presentando un ajuste R^2 de 0.441.

$$\phi_{(P.I)} = -42.31 \left(\frac{W}{W^*}\right)^2 + 43.37 \left(\frac{W}{W^*}\right) + 17.82 \quad (3)$$

$$\phi_{(P.III)} = -197.80 \left(\frac{W}{W^*}\right)^2 + 359.50 \left(\frac{W}{W^*}\right) + 139.00 \quad (4)$$

Siendo ϕ el ángulo de fricción interna expresado en grados sexagesimales. Al comparar los resultados de ambas gráficas, se puede destacar el hecho de que los valores de Ángulo de Fricción Interna, a medida que aumenta la Energía de Compactación, son numéricamente superiores. Así, para un Próctor Normal (Tipo I) el valor de Ángulo de Fricción Interna esperado a la Humedad Óptima tiene valores medios de **18.88** grados sexagesimales, mientras que para el Próctor Normal Alternativa B (Tipo III) ese valor es de **22.70** grados sexagesimales.

4. Conclusiones

A modo de conclusión es menester destacar que los parámetros resistentes del suelo resultan superiores conforme se aumente el nivel de energía de compactación empleada en el remoldeo del

suelo. Para el caso del presente trabajo, un rango de energías aplicadas delimitadas por el ensayo Próctor Normal (Tipo I) y el ensayo Próctor Normal alternativa B (Tipo III).

Por otro lado, se observa una clara tendencia a la disminución del valor de estos parámetros a medida que la respectiva humedad de moldeo aumenta, esto a causa de la posible ocupación del agua en los poros del material, lo que provoca la lubricación de los granos de suelo, generando menor trabazón e interacción entre éstos.

Se han presentado ecuaciones de ajuste de las gráficas obtenidas, donde se puede identificar el comportamiento observado conforme se acerca o aleja la humedad de moldeo de la correspondiente humedad óptima de cada ensayo tipo Próctor en suelo laterítico de 16 sitios diferentes de la región.

Estos resultados representan un avance significativo en el objetivo de poder describir el comportamiento de los parámetros resistentes del suelo colorado característico de la Provincia de Misiones. Resultan útiles en el ámbito práctico ya que se puede determinar de manera aproximada los valores de Cohesión y Ángulo de Fricción Interna en función de la humedad óptima de un ensayo Próctor Normal o Normal alternativa B.

Aun así, teniendo en cuenta la variabilidad de los resultados y los ajustes de las ecuaciones resultantes, se considera necesario la realización de un mayor número de ensayos para poder realizar un contraste de la hipótesis planteada en las curvas presentadas anteriormente.

Sin embargo, con cierto criterio profesional, los guarismos de los parámetros resistentes del suelo laterítico compactado regional, pueden ser utilizados como estimativos para la verificación o anteproyecto de obra civil.

5. Agradecimientos.

Se agradece la colaboración en laboratorio de todos los integrantes adscriptos al proyecto de investigación “Estudio del Comportamiento Geomecánico de Suelos Residuales Lateríticos Compactados”, Código 16/I145 y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Misiones, por el financiamiento de las Becas de Iniciación a la Investigación de la alumna de la Carrera de Ingeniería Civil, Drewes, Ingrid B. en el marco del mismo proyecto. Además, se agradece la colaboración del Grupo Consultor Mesopotámico (GCM) por los aportes realizados ya sea en muestras de suelos como resultados de ensayos.

6. Referencias

- [1] Drewes I. B., Piñeyro A. V., Reinehr M. T., Semañuk M. A., Morgenstern M. E., Drewes M., Reinert H. O., Pintos N. A., Bogado G. O. Comparación de Parámetros Resistentes de Suelos Regionales Según Energía de Compactación. Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción 2018 de la Facultad de Ingeniería de la UNaM.
- [2] Drewes I. G., Piñeyro V. A., Semañuk M. A., Drewes M., Reinert H. O., Pintos N. A. Variación de Parámetros Resistentes de Suelos Residuales Lateríticos Compactados. XXVI Seminário de Iniciação Científica – Participante ESTRANGEIRO. Salão do Conhecimento. UNIJUI 2018.

- [3] Piñeyro V. A., Drewes I. G., Reinehr M. T., Demonari F. E., Bogado G. O., Pintos N. A. Análisis de Cohesión y Ángulo de Fricción Interna de Suelos en Ensayos Próctor Normal Alternativa B. XXVI Seminário de Iniciação Científica – Participante ESTRANGEIRO. Salão do Conhecimento. UNIJUI 2018.
- [4] NORMA IRAM 10501-1972. “Método de ensayo de compactación en laboratorio”.
- [5] NORMA IRAM 10507-1986. “Método de determinación de la granulometría mediante tamizado por vía húmeda.”
- [6] NORMA IRAM 10501*-2007. “Método de determinación del límite líquido y del límite plástico de una muestra de suelo. Índice de fluidez e índice de plasticidad.”
- [7] NORMA IRAM 10509-1982. “Clasificación de suelos, con propósitos ingenieriles”.
- [8] NORMA IRAM 10529-1985. “Método de ensayo de compresión triaxil en suelos cohesivos sobre probetas no consolidadas ni drenadas.”