

## Curvas representativas del comportamiento de la cohesión y ángulo de fricción interna de suelos regionales compactados asociados a la humedad óptima y energía de moldeo

Drewes Ingrid B.<sup>a\*</sup>, Drewes Mario<sup>a</sup>, Blech Santiago R.<sup>a</sup>, Burtnik Anahí B.<sup>a</sup>, Reinert Hugo O.<sup>b</sup>; Pintos Nicolás A.<sup>c</sup>; Bogado Gustavo O.<sup>c</sup>.

<sup>a</sup> Integrante del Proyecto, Estudiante de Ingeniería Civil, Laboratorio de Ingeniería Civil (LIC), Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de Misiones (FI-UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.

<sup>b</sup> 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.

<sup>c</sup> 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-mails: [ingridbdrewes@gmail.com](mailto:ingridbdrewes@gmail.com), [mariodrewes98@gmail.com](mailto:mariodrewes98@gmail.com), [blechsanti@gmail.com](mailto:blechsanti@gmail.com), [anahi.burtnik@gmail.com](mailto:anahi.burtnik@gmail.com), [reinert@fio.unam.edu.ar](mailto:reinert@fio.unam.edu.ar), [nicolasagustinpintos@gmail.com](mailto:nicolasagustinpintos@gmail.com), [gustavobogado@fio.unam.edu.ar](mailto:gustavobogado@fio.unam.edu.ar).

---

### Resumen

En este artículo se exponen los resultados obtenidos de ensayos de laboratorio y su análisis como parte del proyecto de investigación código 016/I145 y la continuidad del mismo planteada en el proyecto 16/I1155 - IDP, con el objetivo principal de formar un registro de los parámetros resistentes de los suelos lateríticos residuales que se encuentra en la región noreste del país. Se ensayaron 17 muestras de diferentes sitios de la región sur de la provincia de Misiones. Los ensayos realizados son de Caracterización y determinación de propiedades índice, de compactación Próctor y Ensayos en cámara triaxial a humedad de moldeo, siguiendo las Normas IRAM. Los resultados obtenidos se procesan con el trazado de curvas de comportamiento de los parámetros resistentes (cohesión y ángulo de fricción interna) en función de la humedad óptima, y teniendo en cuenta la energía de compactación empleada para el moldeo, comparando los resultados para ambas. Los datos obtenidos resultan de gran utilidad para definir la capacidad de carga de los suelos y establecer criterios para el adecuado uso de los mismos en obras civiles regionales. Se prevé continuar los estudios aumentando el número de muestras para validar o modificar los resultados alcanzados hasta el presente.

*Palabras Clave* – Ángulo de fricción interna, Cohesión, Energía de compactación, Humedad óptima, Triaxial.

### 1. Introducción

En todas las obras civiles se requieren los parámetros resistentes del material de apoyo de las mismas para el pre-diseño de cimentaciones, lo que requiere la realización de múltiples ensayos de suelos. Los procedimientos de diseño y verificación en la actualidad hacen uso de criterios y datos de suelos de otras regiones del país, ya que la normativa vigente no contempla al material presente en la zona noreste de la República Argentina. Al tratarse de un suelo residual, y llevar adelante los métodos de clasificación, por ejemplo, se considera a los suelos regionales como no aptos para soporte de cargas. Sin embargo, la experiencia de los profesionales de la construcción de la provincia y de toda la región, expone lo contrario, observando obras edilicias y viales de más de 40 años en servicio, perfectamente funcionales.

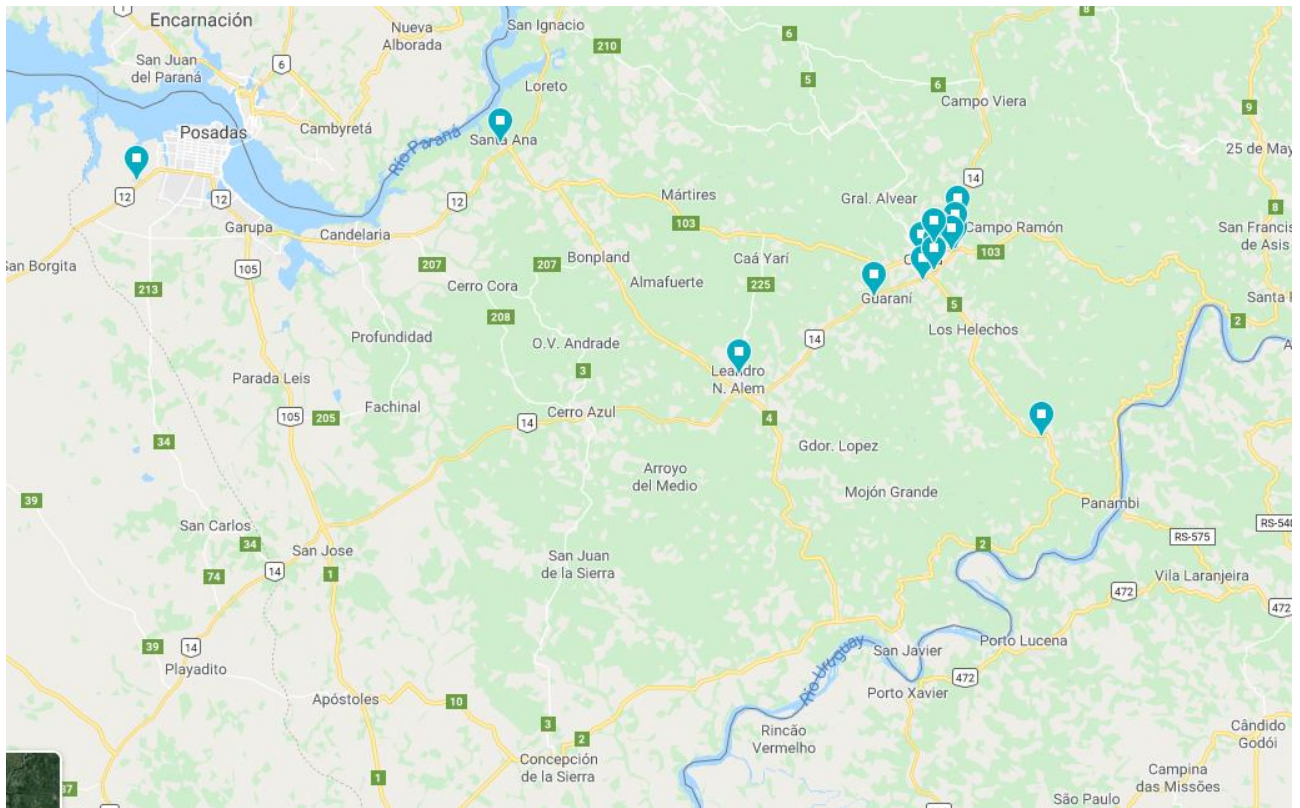
Debido a esto, surge la necesidad de generar un registro con los parámetros geo mecánicos, propiedades físicas y caracterización de estos suelos (G. O. Bogado et al., 2017 [1]; O. E. De Salvo 1990 [2]; I. B. Drewes et al., 2017 [3], [4] y [5]; M. Drewes et al., 2019 [6]), con el fin de evaluar su comportamiento ante la presencia de cargas. En el presente trabajo se realiza una ampliación del estudio de los datos presentados en los artículos citados anteriormente.

Se exponen los resultados de los ensayos realizados en el marco del proyecto de investigación “Estudio del comportamiento Geomecánico de los suelos residuales lateríticos compactados”, código 16/I145, y de su continuidad propuesta en el proyecto 16/I1155 – IDP, que persiguen el objetivo mencionado en el párrafo anterior. Dichos ensayos son: Caracterización de suelos, ensayos de compactación, y ensayos en cámara triaxial. Todos ellos son llevados a cabo siguiendo los lineamientos que establecen las normas IRAM.

Específicamente, se presentan las tendencias de los parámetros resistentes de los suelos en estudio (cohesión y ángulo de fricción interna) en relación a sus humedades óptimas de compactación, y además, en relación a la energía de compactación utilizada durante los ensayos precedentes de compactación (Proctor normal y Proctor normal alternativa B).

## **2. Metodología**

Las muestras de suelo utilizadas en el proyecto de investigación son extraídas en campo por los integrantes del proyecto, proporcionadas por empresas externas y recibidas en el LIC de la Facultad de Ingeniería de Oberá. Se trata de muestras de diferentes ubicaciones dentro de la zona sur de la provincia de Misiones, las cuales pueden observarse en la figura 1.



**Fig. 1. Sitios de toma de muestras.**

Las rutinas de ensayo a las que son sometidas las muestras se pueden dividir en cuatro etapas:

- 1) Caracterización y clasificación de la muestra: Ensayos de Granulometría por vía húmeda (IRAM 10507 [7]), Clasificación de Suelos (IRAM 10509 "SUCS" [8]) y Determinación de Límites de Atterberg (IRAM 10501[9]);
- 2) Ensayos de compactación: Proctor normal y normal alternativa B (IRAM 10511[10]);
- 3) Ensayos en cámara triaxial, consolidado no drenado (IRAM 10529[11]), incluyendo el remoldeo de puntos en caso de que sea necesario.
- 4) Ensayos CBR: Método de determinación del Valor Soporte Relativo e Hinchamiento de los Suelos (IRAM 10520 [12]).

Las dos últimas etapas (3 y 4) pueden ser realizadas en simultaneo ya que, si bien requieren datos o material de la etapa anterior (2), no son dependientes entre sí.

De los ensayos de compactación se obtienen valores de humedad óptima de cada punto a su respectiva energía de compactación ( $70 \text{ kg.cm/cm}^3$  para el ensayo Proctor Normal y  $100 \text{ kg.cm/cm}^3$  para el ensayo Proctor Normal alternativa B). De este ensayo también resultan 5 a 6 probetas de 120-125 mm de alto y 101 mm de diámetro, por cada energía de compactación, es decir, 10 a 12 probetas por cada muestra de suelo. Estas se almacenan en cámara húmeda y sirven de materia prima para el ensayo en cámara triaxial. Para esto, se tallan hasta obtener 100 mm de alto y 5 de

diámetro, y ensayan inmediatamente después, en medida de lo posible, buscando no alterar su contenido de humedad.

Para obtener los parámetros resistentes de la muestra, se realiza el ensayo en cámara triaxial en condición no consolidado no drenado, con la humedad correspondiente a cada punto y no en condición saturada como indica la norma IRAM correspondiente, ya que se busca evaluar los parámetros resistentes en relación a dichas humedades. Además, no se utilizan las tres probetas indicadas en la normativa, sino una sola, sobre la cual se realiza un escalonamiento de cargas. Estas modificaciones en el ensayo se realizan buscando simular el estado que tendría la muestra en el campo, y para reducir los errores de variación de humedad que pueden presentarse cuando se moldean las probetas.

De los ensayos en laboratorio se obtienen deformaciones y valores de cargas a las cuales se dan esas deformaciones, estos datos deben ser procesados mediante una planilla adaptada por miembros del proyecto de investigación, para obtener los datos buscados de la probeta correspondiente: Cohesión y Ángulo de fricción interna. El procedimiento consiste en calcular las tensiones máximas y mínimas, correspondientes a los tres saltos de carga, y graficarlas utilizando la envolvente de falla Mohr – Coulomb (utilizada comúnmente para describir la resistencia cortante de los suelos). De este grafico se extraen directamente los valores requeridos, siendo el ángulo de fricción interna el ángulo que forma la recta envolvente con la horizontal, y la cohesión, la ordenada donde corta la recta envolvente.

Una vez obtenidos los parámetros de todas las probetas de una muestra, para cada energía de compactación, se grafican en función de la humedad y se obtienen los valores característicos para la muestra de suelo. Se denominan “valores característicos” de la muestra en este artículo a los guarismos de cohesión y ángulo de fricción interna que se dan para la humedad óptima de cada muestra. Con estos datos se puede realizar la comparación final.

### **3. Resultados y discusión:**

De los ensayos de caracterización realizados a 17 muestras de suelo de la provincia de Misiones, se obtienen los siguientes rangos de variación de los valores de Límites de Atterberg y granulometría, siendo todos ellos clasificados como suelos finos por lo que en la clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos los ubica como MH (Limo arcilloso de alta plasticidad) o ML (Limo arcilloso de baja plasticidad).

- Límites de Atterberg:
  - Límite Líquido: 40% - 79%
  - Límite Plástico: 31% - 52%
  - Índice de Plasticidad: 9% - 35%

- Granulometría:
  - Pasante tamiz #200 entre 88% y 100% (Suelos Finos)
- Clasificación “SUCS”:
  - Limo de Alta Plasticidad – MH (en su mayoría)
  - Limo de Baja Plasticidad – ML (pocos casos)

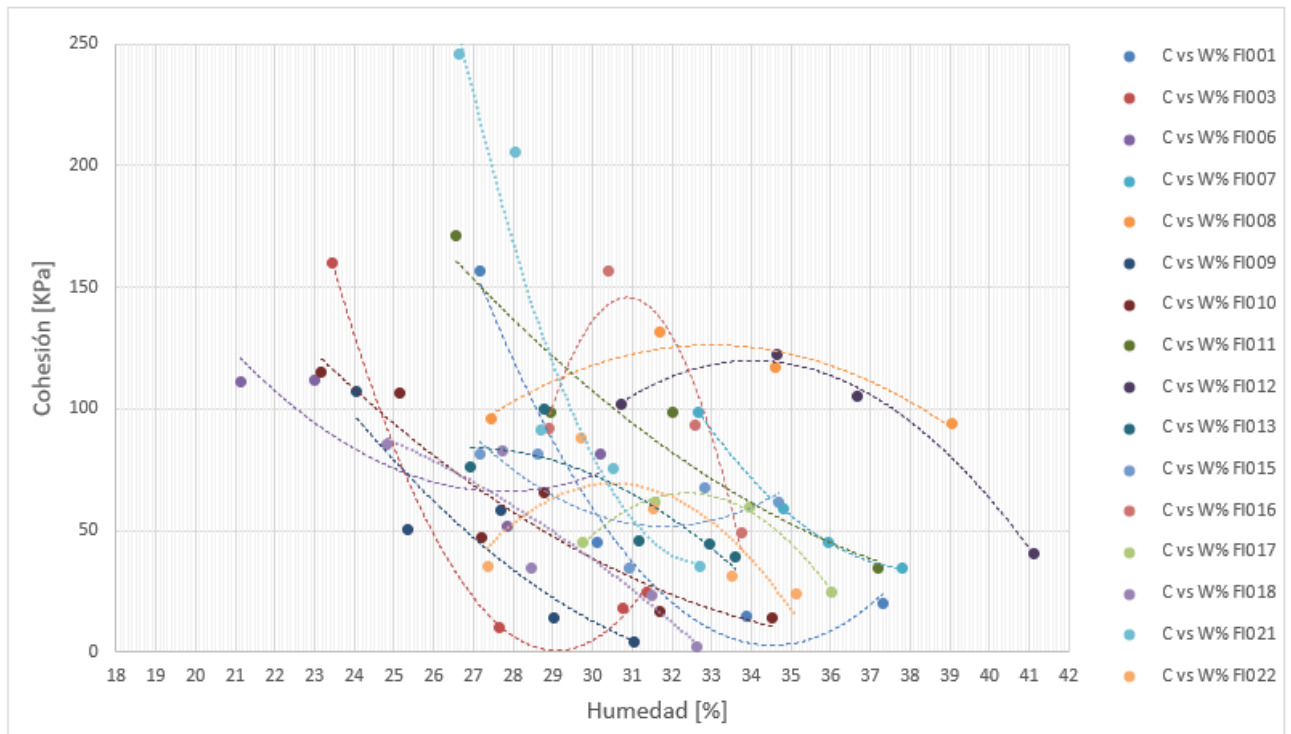
Para graficar los resultados procesados del ensayo triaxial, valores de cohesión y ángulo de fricción interna, se utilizan curvas de tendencia polinómica de grado 2, debido a que estas son las que describen en mejor manera o con mejores ajustes las tendencias obtenidas. Las curvas de los parámetros resistentes para cada muestra, en función de la humedad de moldeo, pueden observarse en las figuras 2 y 3 para la energía de compactación correspondiente a los ensayos proctor normal, y en las figuras 4 y 5, para los ensayos proctor normal alternativa B. Los valores característicos extraídos de dichas curvas se listan en la Tabla 1.

A modo de resumen, se observan valores de cohesión de entre 45,00 KPa y 124,00 KPa para energías de compactación de 70 kg.cm/cm<sup>3</sup> (Próctor normal), y entre 33,00 KPa y 152,00 KPa para energías de compactación de 100 kg.cm/cm<sup>3</sup> (Próctor normal alternativa B).

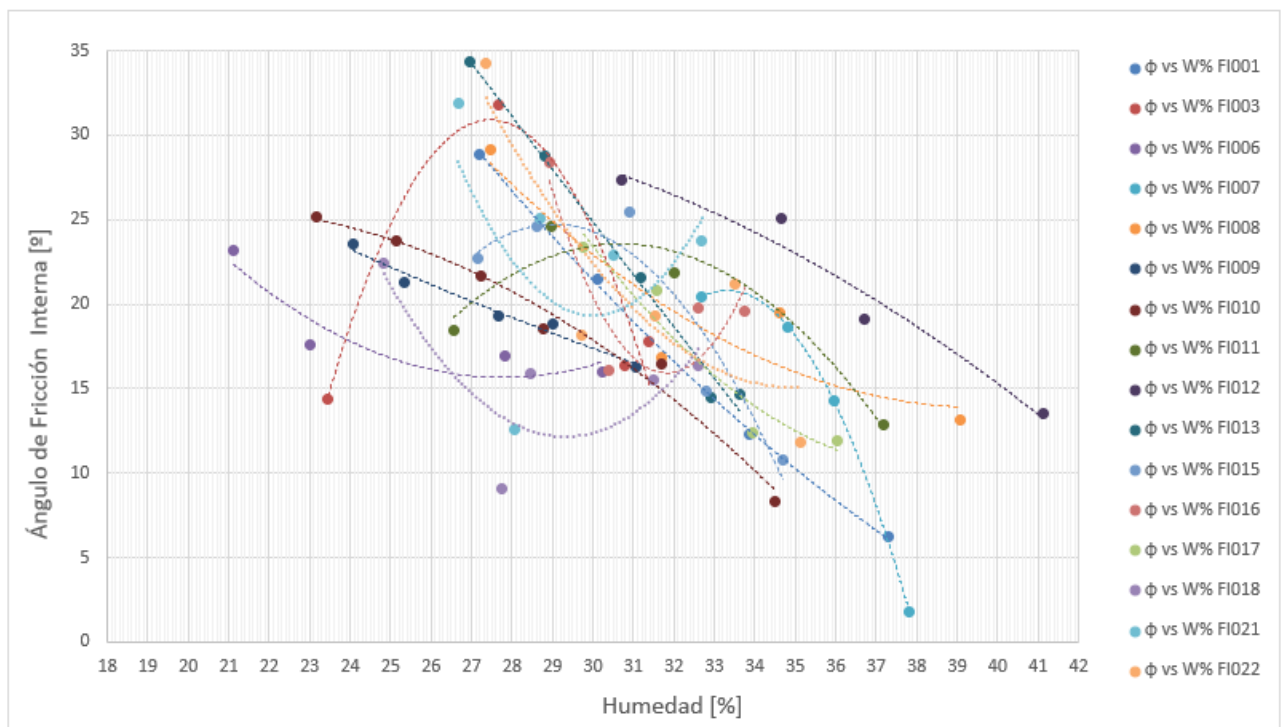
En cuanto a los valores de ángulo de fricción interna, se mantienen dentro del rango de 12° y 23° aproximadamente para el primer ensayo, y entre 16° y 30° para el ensayo con mayor energía de compactación.

En las figuras 6 y 7 se presentan las curvas comparativas de ambos parámetros, para las dos energías de compactación analizadas.

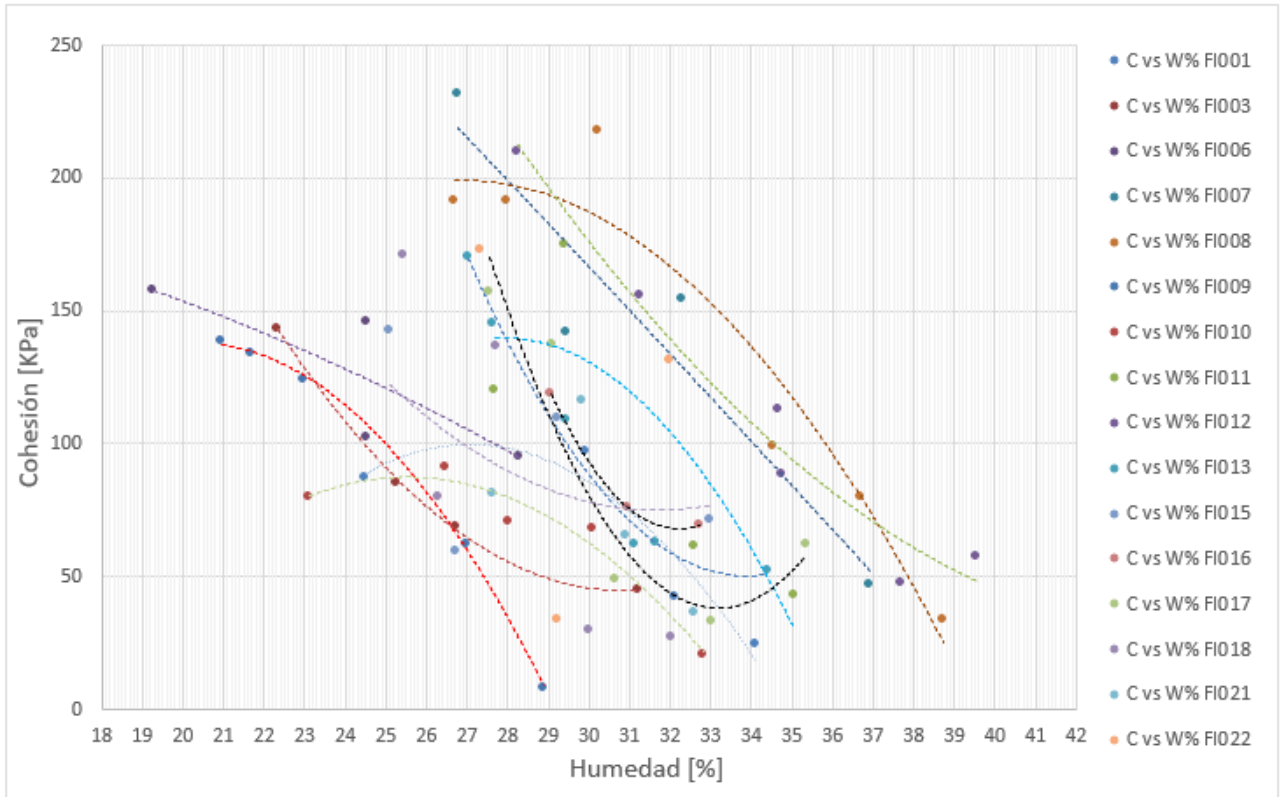
De la observación de las curvas se puede deducir que, independientemente del contenido de humedad del suelo, o mejor dicho, de la humedad óptima requerida, ambos parámetros presentan un aumento en sus valores a mayor energía de compactación.



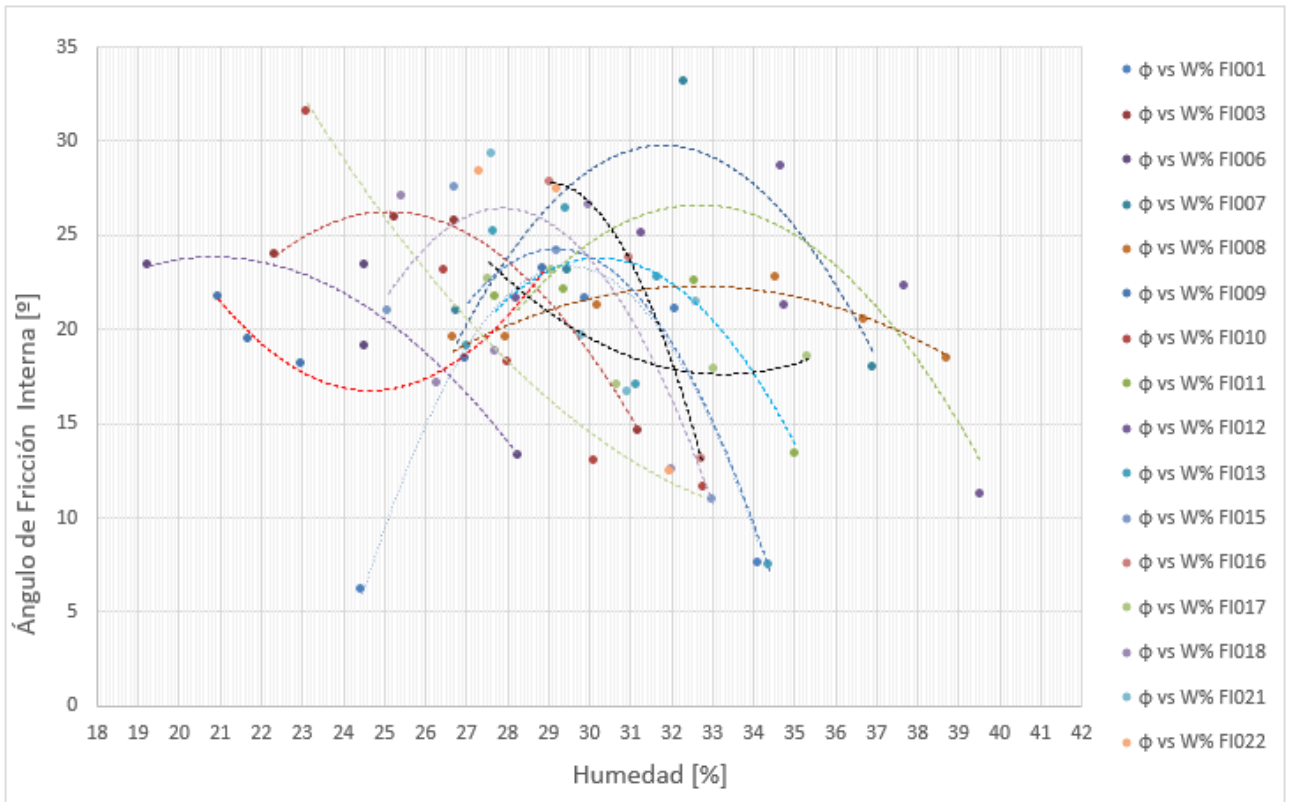
**Fig. 2. Curvas de Cohesión vs Humedad – Proctor Normal.**



**Fig. 3. Curvas de Ángulo de Fricción Interna vs Humedad – Proctor Normal.**



**Fig. 4. Curvas de Cohesión vs Humedad – Proctor Normal Alternativa B.**



**Fig. 5. Curvas de Ángulo de Fricción vs Humedad – Proctor Normal Alternativa B.**

**Tabla 1. Valores característicos obtenidos de ensayos Proctor y Triaxial.**

Muestra	Proctor Normal			Proctor Normal Alternativa B			
	cohesión	ángulo de fricción interna	humedad óptima	cohesión	ángulo de fricción interna	humedad óptima	
	[KPa]	[°]	[%]	[KPa]	[°]	[%]	
1	FI001	46,00	22,00	30,50	77,00	22,80	30,00
2	FI003	50,00	18,60	28,40	60,00	24,60	27,40
4	FI006	73,00	16,70	25,30	128,00	22,00	23,80
5	FI007	98,90	20,40	32,70	134,00	30,00	32,00
6	FI008	124,00	16,40	34,50	152,00	22,30	33,00
7	FI009	48,00	20,20	27,00	100,00	16,90	25,00
8	FI010	48,00	19,50	29,00	80,00	18,30	28,00
9	FI011	77,00	22,60	32,50	113,00	23,10	31,50
10	FI012	60,00	20,30	37,00	93,00	25,00	35,00
11	FI013	60,00	20,00	31,50	72,00	22,30	31,00

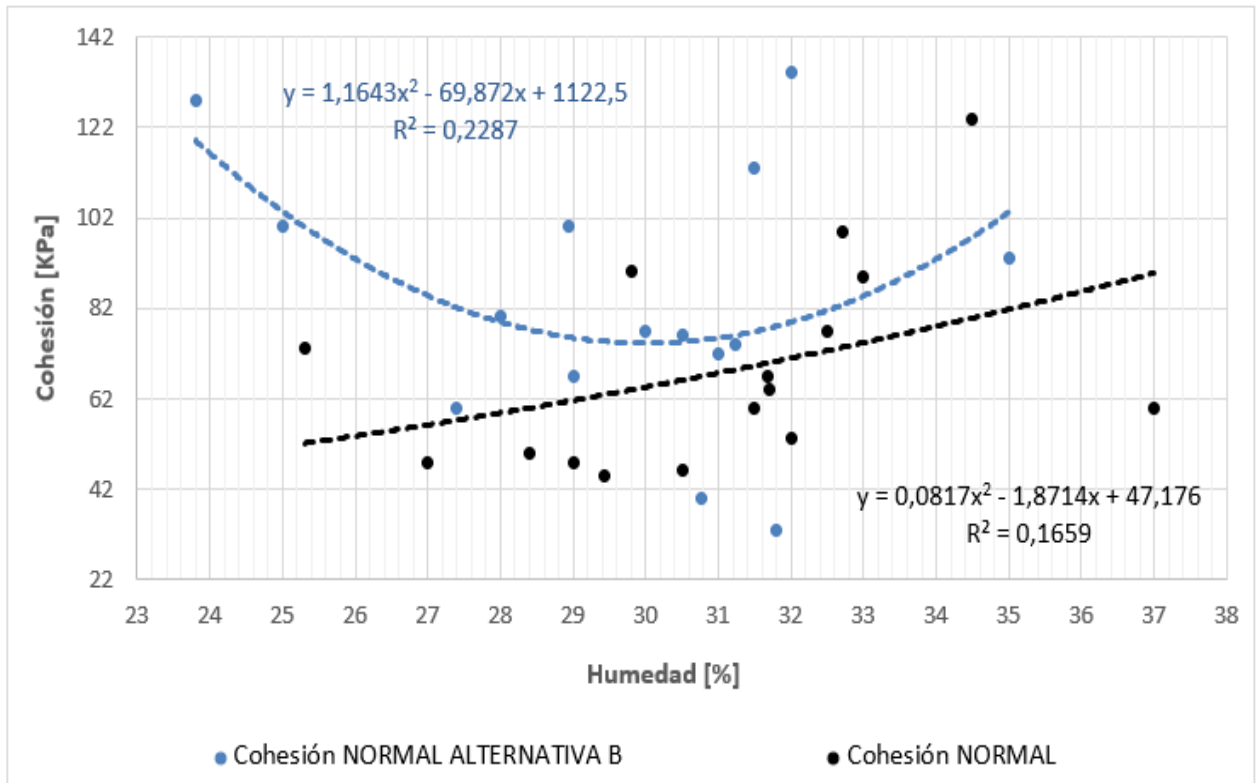


12	FI015	53,00	19,80	32,00	76,00	22,30	30,50
13	FI016	89,00	18,00	33,00	74,00	22,50	31,23
14	FI017	64,00	18,80	31,70	33,00	16,30	31,80
15	FI018	45,00	12,50	29,43	67,00	21,67	29,00
16	FI021	90,00	19,80	29,80	100,00	22,00	28,95
17	FI022	67,00	18,30	31,68	40,00	21,00	30,77

Respecto a las tendencias que exhiben se puede afirmar:

- La cohesión inicialmente crece con el aumento de la humedad óptima, pero si se aumenta la energía de compactación, este comportamiento se replica recién para humedades óptimas mayores a 30%, hasta entonces, presenta un comportamiento decreciente.
- En cuanto al ángulo de fricción interna, primeramente, se observa un decremento del guarismo a medida que crece la humedad óptima, no obstante, si se aumenta la energía de compactación esta tendencia presenta el comportamiento contrario.

Además de los resultados presentados, se encuentran aún en estudio muestras con alto contenido de saprolito. Estas muestras no fueron incluidas ya que corresponden a una clasificación distinta a las demás y disminuyen el ajuste de las curvas presentadas, por tener parámetros resistentes fuera de los rangos mencionados para los suelos aquí presentados, que constituyen los tradicionales suelos colorados regionales.



**Fig. 6. Curvas Cohesión vs Humedad Óptima para Proctor Normal y Normal alternativa B.**

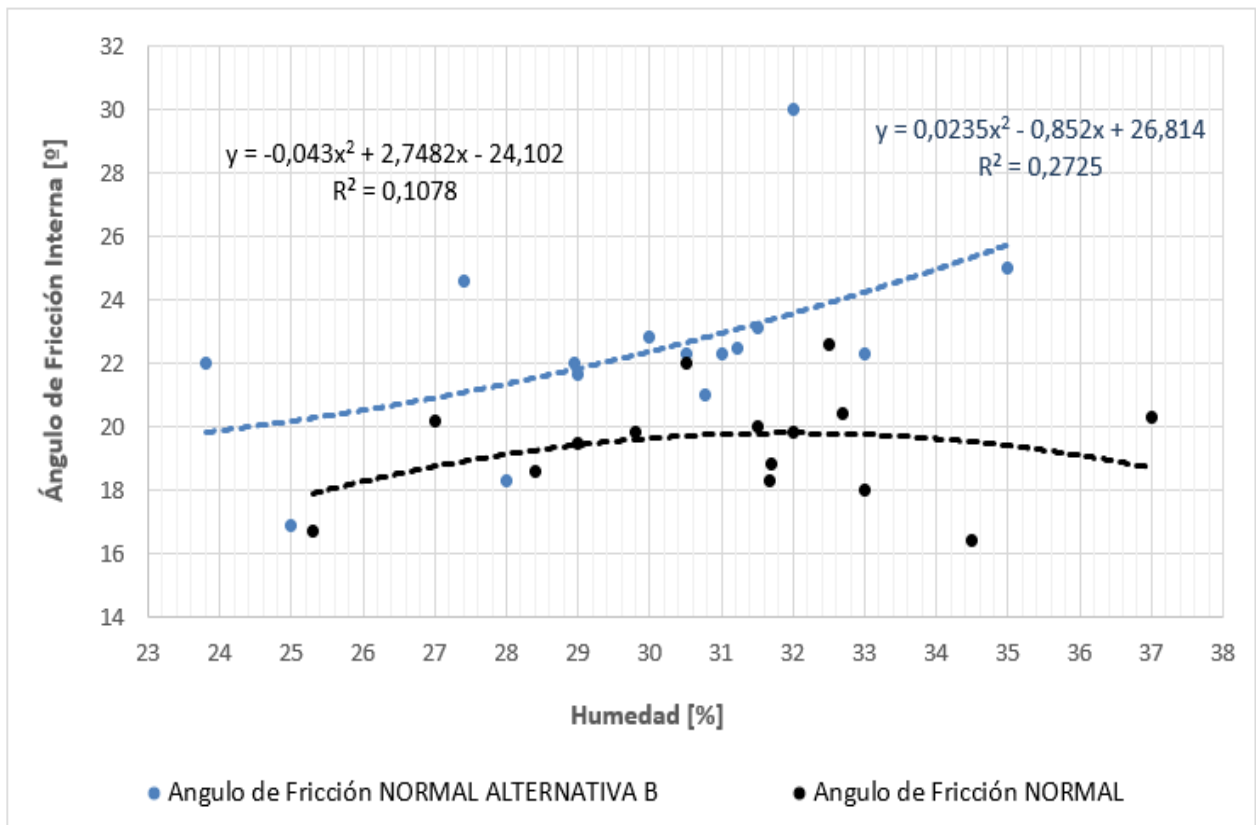


Fig. 7. Curvas Ángulo de fricción interna vs Humedad Óptima para Proctor Normal y Normal alternativa B.

#### 4. Conclusiones:

Se puede concluir que el comportamiento de los parámetros resistentes de los suelos regionales lateríticos compactados (tradicionalmente indicados como suelos colorados) sigue tendencias aproximadas dadas por curvas parabólicas (polinómicas de grado 2). En ambos parámetros se puede observar un aumento general de sus valores al incrementar la energía de compactación correspondiente a los ensayos proctor. Este crecimiento no se desarrolla de igual manera punto a punto, esto quiere decir que no es lineal o proporcional a la humedad ni a la energía de compactación.

En cuanto a las tendencias en relación a la humedad óptima de compactación, los valores de cohesión muestran un crecimiento a medida que se aumenta la humedad optima luego de un valor crítico del 30%, para ambas energías de compactación. Por otra parte, no se puede definir una tendencia que abarque ambas energías estudiadas para el ángulo de fricción interna, ya que su comportamiento difiere sustancialmente con ella.

No obstante, estos resultados presentan un avance en el objetivo de lograr un registro de las características de los suelos colorados regionales, que resulta de gran utilidad en el ámbito práctico

ya que con ellos se puede definir la capacidad portante del suelo, evaluar empujes en estructuras, analizar la estabilidad de taludes en excavaciones, entre otras aplicaciones. Este factor es indispensable para formular criterios de pre diseño en obras civiles.

En contraposición con los resultados que se habían obtenido en anteriores estudios de los parámetros resistentes de los suelos regionales (M. Drewes et al., 2019 [6]), se observa una mejora considerable en los ajustes de las curvas finales (Cohesión y fricción en función de la humedad óptima). Aun así, son ajustes bajos y se busca que superen el 60%-80%, por lo tanto, se debe continuar estudiando los parámetros en cuestión, mediante el aumento del número de muestras y ensayos con los suelos regionales.

### **Agradecimientos:**

Este trabajo pudo concretarse gracias a 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.

### **5. Referencias:**

- [1] G. O. Bogado, H. O. Reinert, and F. M. Francisca, “Geotechnical properties of residual soils from the North-east of Argentina”. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 2017.
- [2] O. E. De Salvo, “El Perfil de Meteorización de las Rocas Basálticas y su Importancia en la Ingeniería de Fundaciones”, APE y APG. *Revista Técnica de las Asociaciones Paraguayas de Estructuras y Geotecnia, Ediciones y Arte SRL*. Año 1, Nro. 1, Octubre 1990, Asunción, Paraguay.
- [3] I. B. Drewes, M. A. Semañuk, M. T. Reinehr, V. A. Piñeyro, H. O. Reinert, N. A. Pintos. “Evaluación de cohesión y ángulo de fricción en rama seca y húmeda de ensayos proctor normal”. *XXV Seminário de Iniciação Científica - Participante ESTRANGEIRO. Salão do Conhecimento. UNIJUI* 2017.
- [4] I. B. Drewes, M. A. Semañuk, M. T. Reinehr, V. A. Piñeyro, H. O. Reinert, N. A. Pintos. “Evaluación de cohesión y ángulo de fricción interna de ensayos proctor normal”. *Jornadas de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Extensión, Vinculación y Muestra de la Producción 2017 de la Facultad de Ingeniería de la UNaM, Oberá* 2017.
- [5] I. B. Drewes, M. Drewes, H. O. Reinert, N. A. Pintos, G. O. Bogado. “Comparación de Parámetros Resistentes de Suelos Regionales Según Energía de Compactación”. *JIDeTEV 2018 de la Facultad de*

*Drewes Ingrid et al.: Jornadas de Investigación Desarrollo Tecnológico Extensión y Vinculación - Voll-Año 2020-ISSN 2591-4219*

Ingeniería de la UNaM, Oberá 2018.

- [6] M. Drewes, S. R. Blech, A. B. Burtnik, M. E. Amores, C. L. Ebert, I. B. Drewes, M. A. Semañuk, H. O. Reinert, N. A. Pintos, G. O. Bogado. "Cohesión y Ángulo de Fricción Interna de Suelos Lateríticos Compactados en Relación a la Humedad Óptima de Compactación". JIDeTEV 2019 de la Facultad de Ingeniería de la UNaM, Oberá 2019.
- [7] Norma IRAM 10507 " Método de determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda " - 1986.
- [8] Norma IRAM 10509 "Clasificación de los suelos, con propósitos ingenieriles " - 1982.
- [9] 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.
- [10] Norma IRAM 10511 " Método de ensayo de compactación en laboratorio " - 1972.
- [11] Norma IRAM 10529 " Método de ensayo de compresión triaxil en suelos cohesivos sobre probetas no consolidadas ni drenadas " - 1985.
- [12] Norma IRAM 10520 "Método de determinación del Valor Soporte Relativo e Hinchamiento de los Suelos"- 1971.