

ANÁLISIS DE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN EN SUELOS TROPICALES DE MISIONES, ARGENTINA

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de ensayos de laboratorio, desarrollada en el proyecto de investigación (código 16/I145) de la Facultad de Ingeniería de Oberá, Universidad Nacional de Misiones, teniendo como objetivo aportar conocimientos sobre las características geomecánicas de los suelos residuales compactados de la zona y obtener posibles correlaciones entre las propiedades índices y parámetros de compactación. Las propiedades índices medidas fueron; límites de Atterberg, granulometría por tamizado vía húmeda y clasificación de los suelos mediante el sistema unificado (SUCS). Además, se realizaron ensayos de compactación en el laboratorio siguiendo la normativa (IRAM 10511-1972) variando la energía de compactación. En cuanto a los resultados obtenidos al variar la energía de compactación del método normal a su alternativa B, indican un aumento de densidad seca máxima y una disminución de la humedad óptima, acorde a lo esperado cuando se aumenta la energía de compactación. Por otro lado se correlacionan las propiedades índices con los parámetros de compactación mediante regresión estadística. Los primeros resultados obtenidos indican una buena correlación entre las propiedades índices y los índices de compactación (humedad óptima y densidad seca máxima).

Palabras clave: *Compactación - humedad óptima - densidad seca máxima.*

Introducción

El suelo es un material muy utilizado para todo tipo de obras civiles, por lo que resulta muy importante conocer su comportamiento para proyectar obras eficientes y económicas. Particularmente, los suelos residuales compactados, demuestran un buen desempeño en muchas obras. Sin embargo, los sistemas de clasificación que se utilizan actualmente no tienen en cuenta la naturaleza de su formación debido a que fueron desarrollados para suelos de otras características (Bogado et al., 2017). A modo de ejemplo, el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el Highway Reserch Board (HRB), clasifica a los suelos residuales de alta plasticidad y no recomiendan para ser utilizados como base o sub-base de pavimentos. Haciendo hincapié en lo mencionado anteriormente, se iniciaron una serie de ensayos para elaborar un registro de las propiedades estudiadas, con el fin de proporcionar información base sobre el comportamiento de los suelos de la provincia y estimar posibles correlaciones.

En correspondencia al trabajo de laboratorio y el análisis de los parámetros obtenidos en los ensayos de compactación “Proctor” (método normal y método normal alternativa B, Norma IRAM 10511-1972 “Método de ensayo de compactación en laboratorio”), humedad óptima, densidad seca máxima y cómo influye la energía de compactación en mencionados resultados, se propone elaborar propuestas para el tratamiento adecuado y la optimización de su uso.

Metodología

Las muestras empleadas se obtuvieron de diferentes servicios realizados por la Facultad de Ingeniería. Se trata de seis sitios diferentes, todos ellos localizados en la provincia de Misiones. En la Tabla N° 1 se detallan la designación utilizada en este trabajo de cada muestra, su ubicación y el tipo de obra de que se trata.

Tabla N°1: Localización de los sitios de toma de muestra.

Designación	Localidad	Tipo de Obra
FI001	Leandro N. Alem	Industria
FI003	Panambí	Estación transformadora
FI005	Oberá	Estación transformadora
FI006	Guaraní	Industria
FI007	Aristóbulo del Valle	Estación transformadora
FI008	Posadas	Conjunto habitacional

Con las muestras detalladas, se procedió en primera instancia a realizar los ensayos de caracterización correspondientes siguiendo sus respectivas normas de ejecución, Límites de Atterberg (IRAM 10501-2007), Granulometría por tamizado vía húmeda (IRAM 10507-1986), y Clasificación de Suelos (IRAM 10509-1982). Conforme los criterios de clasificación con propósitos ingenieriles, todos los suelos en estudio se agrupan en limos de alta y/o baja plasticidad (ML o MH), con pasante tamiz 200 superior al 85 %, constituyendo en consecuencia suelos del tipo finos. En cuando al ensayo de compactación, se tomó como referencia la Norma (IRAM 10511-1972)

Primeramente, el suelo fue secado al aire a temperatura ambiente por 7 días, posteriormente mortereado y cribado por el tamiz N° 4 (4.75mm). Con el material pasante, se realizaron las rutinas de laboratorio. Las mismas, se basaron en la realización, para cada muestra, de los ensayos de compactación por el “Método Normal” y por el “Método Normal, alternativa B”. En la Tabla N°2 se detallan los criterios o requerimiento de normativa.

Tabla N° 2: Requerimientos de ensayos de compactación realizados

IRAM 10511	Molde		Pisón		N° de capas	N° de golpes por capa
	Capacidad	Diámetro	Diámetro	Masa		
Método normal	0,94 dm ³	101+1 mm	50 mm	2500 gr	3	25
Método normal, alternativa B	0,94 dm ³	101+1 mm	50 mm	2500 gr	3	35

Como aclaración importante, denotamos que los puntos con diferentes humedades se prepararon con suelo natural, es decir, no se reutilizó suelo excedente de otros puntos de compactación. Explicado esto, se siguió estrictamente la Norma mencionada para la ejecución del ensayo.

Resultados y Discusión

En la Tabla N° 3 se presentan los resultados de la caracterización geotécnicas de las muestras obtenidas. Según el SUCS, los suelos residuales ensayados se clasifican como MH-ML.

Tabla N° 3: Resultados de ensayos de caracterización

Muestra	LL	LP	IP	Pasa #200	Clasificación SUCS
FI001	54.20	40.50	13.70	94.95%	MH
FI003	53.00	35.20	17.80	92.72%	MH
FI005	50.80	38.10	12.70	93.81%	MH
FI006	56.30	38.90	17.40	96.70%	MH
FI007	59.00	47.00	12.00	95.61%	MH
FI008	50.00	36.00	14.00	87.91%	ML

En segundo lugar y, haciendo referencia a los resultados de los ensayos de compactación, se detallan en la Tabla N° 4 los guarismos obtenidos de humedad óptima y densidad seca máxima alcanzada, según la aplicación del Método Normal y el Método Normal, Alternativa B.

Tabla N° 4: Humedad óptima y densidad seca máxima alcanzada.

Muestra	FI001	FI003	FI005	FI006	FI007	FI008
Humedad óptima						
Método Normal	30.50	28.40	29.40	34.70	34.50	26.40
Método Normal, alternativa B	30.00	27.40	27.50	33.20	31.00	21.70
Densidad seca máxima						
Método Normal	1.46	1.48	1.53	1.36	1.38	1.51
Método Normal, alternativa B	1.51	1.51	1.58	1.41	1.47	1.63

Las curvas de compactación se detallan en la Figura 1 para los seis suelos analizados, y ambas alternativas de energía de compactación. La variación entre la humedad óptima y densidad seca máxima, para el método normal y el método normal alternativa B, presenta en todos los casos un aumento en la densidad seca máxima y una disminución de la humedad óptima para el caso de la alternativa B, respecto del método normal. Esto se debe, a que el cambio de estructura obtenida por la energía de compactación, al aumentar la misma disminuye los vacíos, como resultado se tiene una estructura menos porosa a expensas de mayor gasto de energía.

En la Tabla N° 5 se expresan en resumen los porcentajes de variación obtenidos para cada suelo analizado.

Tabla N° 5: Variación de humedad óptima y densidad seca máxima.

Muestras	FI001	FI003	FI005	FI006	FI007	FI008
Variación de humedad óptima	0.50 %	1.00%	1.90%	1.45%	3.50%	4.70%
Variación de densidad seca máxima	3.31%	1.99%	3.16%	3.55%	6.12%	7.36%

Como casos puntuales, la muestra FI001, alcanza una densidad seca máxima mayor (3.31%), al disminuir en solo un 0.5% la humedad óptima. Además, la muestra FI008, alcanza una densidad seca considerablemente mayor (7.36%) disminuyendo la humedad óptima en un 4.7%. En rangos generales, la humedad óptima no sobrepasa un rango de variación del 2%, en 4 de las muestras. Se puede decir, que no es un cambio significativo. Las 2 muestras restantes, alcanzan un rango de variación mayor, cercano al 5%.

Con respecto a la densidad seca máxima, encontramos que las mismas 4 muestras mencionadas anteriormente presentan un promedio de aumento del 3% y las 2 muestras restantes, un promedio de aumento de aproximadamente un 6%.

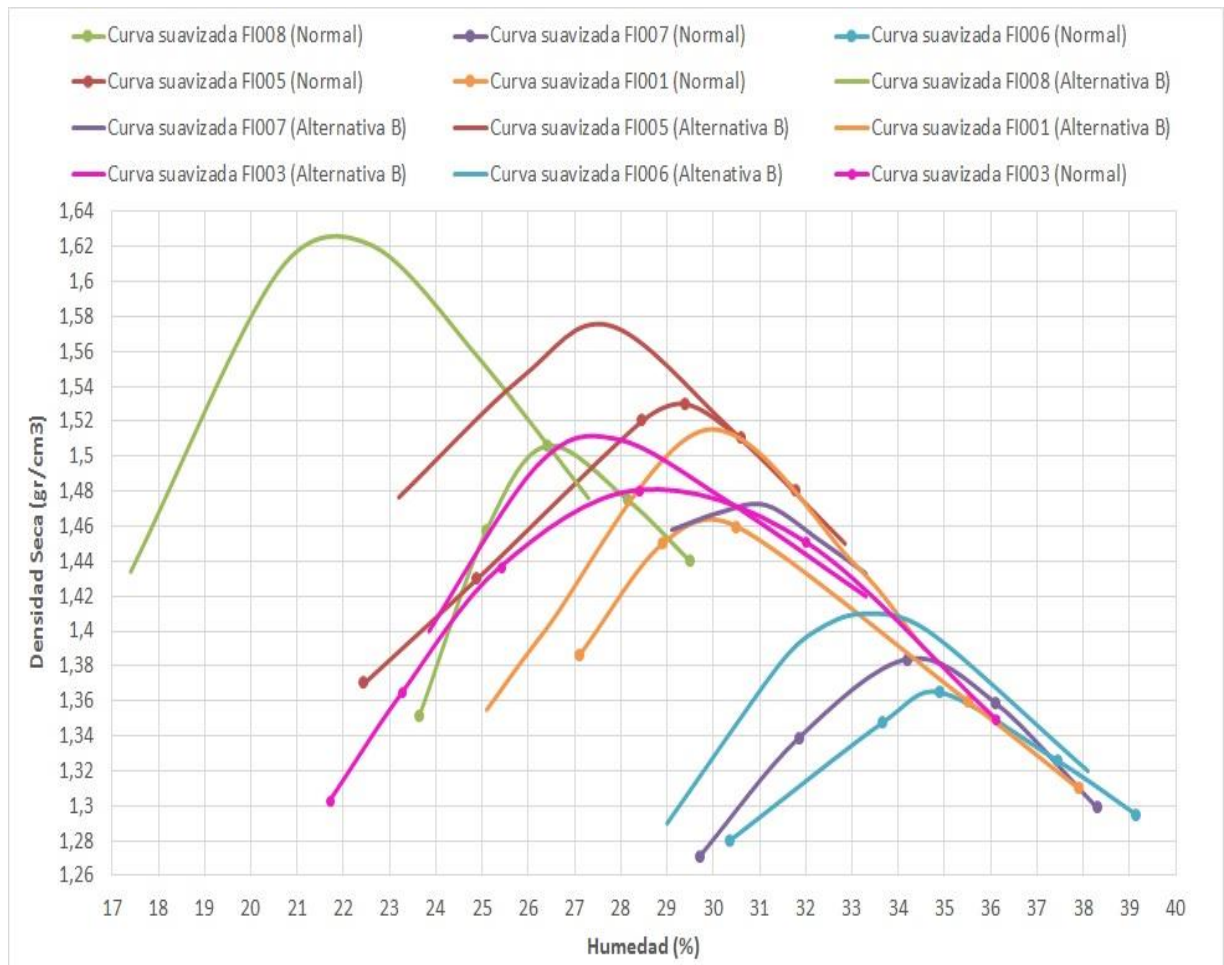


Figura N° 1: Curvas de compactación. Proctor Método Normal y alternativa B.

Los primeros resultados obtenidos en esta investigación fueron analizados con el objetivo de encontrar correlaciones entre las propiedades índices y la humedad de compactación y la densidad seca máxima. Dichas comparaciones pueden llegar a resultar provechosas, dado el nivel de dificultad que posee determinar la curva Proctor.

La Figura 2 (a) detalla la variación de la humedad óptima en función de límite líquido. En los resultados es posible notar el aumento de la humedad óptima cuando el límite líquido aumenta, esta tendencia es observada por diferentes autores. Los resultados además fueron ajustados por el método de mínimos cuadrados y regresión lineal, cuya ecuación se encuentra en dicha Figura, se observa una mejor correlación para la compactación utilizando el método normal.

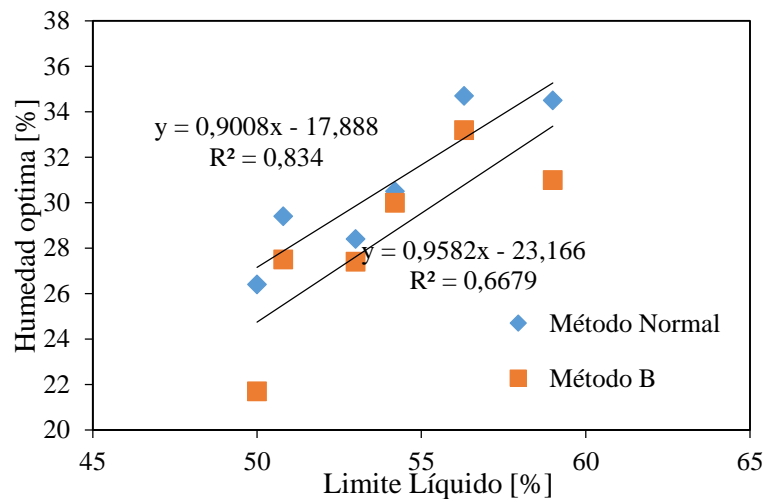
La Figura 2 (b) detalla la variación de la humedad óptima en función del pasante tamiz # 200, dicha correlación puede llegar a ser interesante a la hora de seleccionar suelos residuales de diferentes granulometrías. La tendencia observada resultó un aumento en la humedad óptima al incrementarse el contenido de finos. En la Figura 2 (b) además se indica la ecuación de ajuste por regresión, para este caso particular los datos se ajustaron mediante una ecuación del tipo cuadrática. El coeficiente de correlación es un indicador del ajuste que poseen los datos, en este caso el $R^2 > 0.92$, lo cual indica una fuerte correlación entre ambos parámetros. En ambos casos, la humedad óptima es menor para el método B, los cuales se reflejan en un valor de ordenada al origen menor, para la curva de regresión.

Por otro lado, se analizó el efecto de propiedades índices sobre la máxima densidad seca. Estos resultados son presentados en la Figuras 3(a) y 3(b).

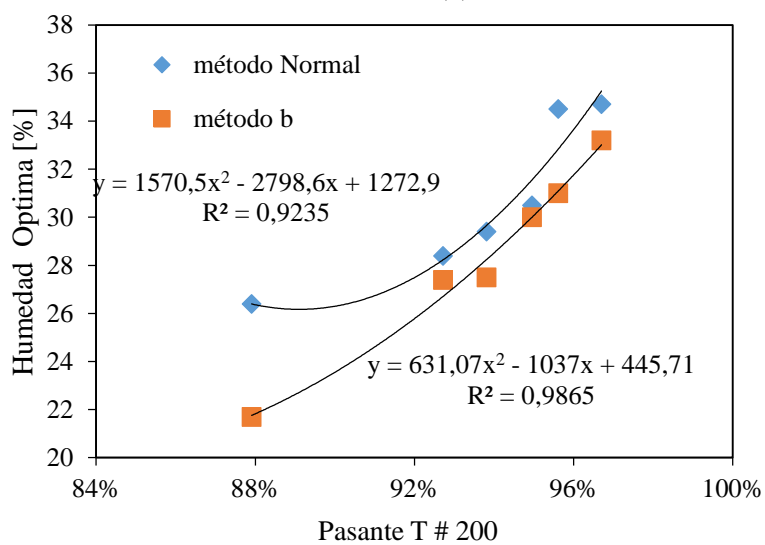
La relación del γ_d -LL indica una disminución de la densidad seca máxima con el aumento del límite líquido, esta relación fue ajustada por regresión lineal.

En cuanto a la relación γ_d -P#T200 existe una disminución de la densidad seca máxima con el aumento de fino, esto resultado indicaría a priori lo beneficioso de tener un elevado contenido de finos, dados que los mismos disminuyen la densidad seca máxima, por lo cual, se necesitaría menor energía de compactación para lograr dichas densidades. Además, dicha relación fue ajustada por un modelo de regresión cuadrático de fuerte correlación con los resultados.

De las primeras experiencias observadas y obtenidas por parte del grupo de trabajo es posible observar diferentes correlaciones entre las propiedades índices y los parámetros de compactación. Resulta necesario y extremadamente importante aumentar el número de datos de ensayos de compactación y propiedades índices para verificar las tendencias y disminuir los errores en cada correlación.



(a)



(b)

Figura N° 2: Influencia del límite líquido (a) y Pasante T#200 (b) sobre la humedad óptima de compactación para diferentes energías.

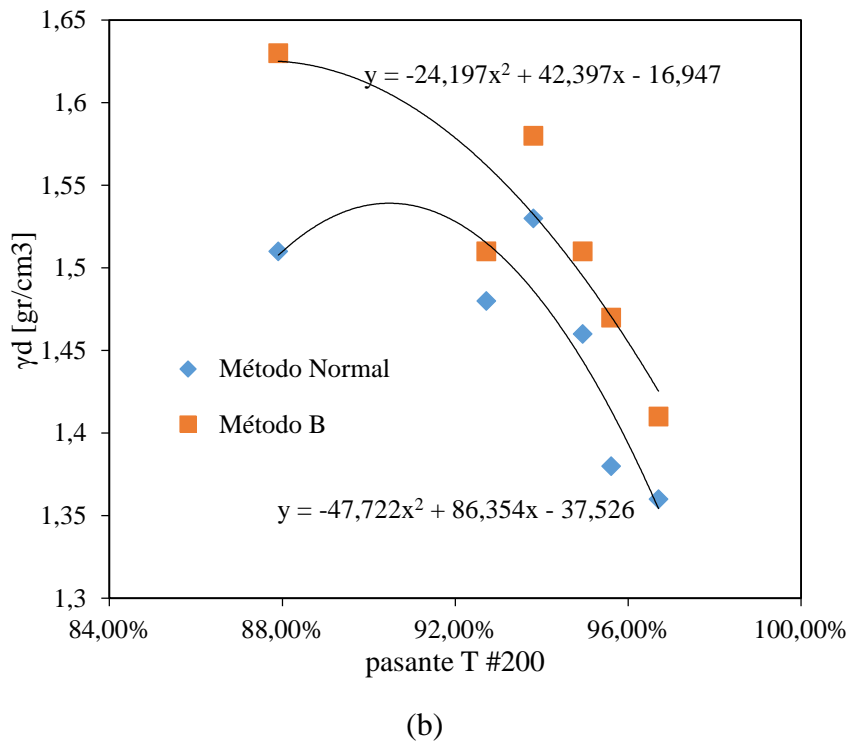
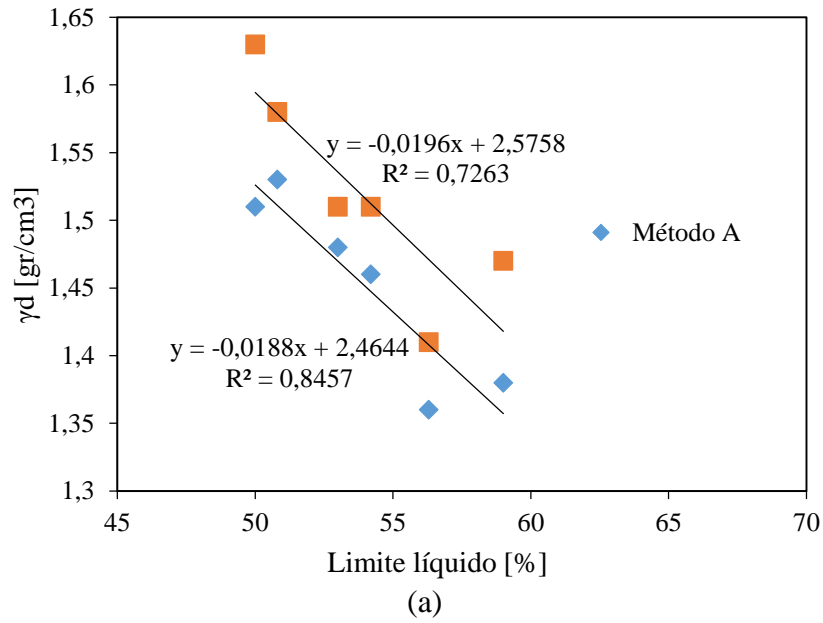


Figura N° 3: Influencia del límite líquido (a) y Pasante T#200 (b) sobre la densidad seca máxima de compactación para diferentes energías.

Conclusiones

Aportando al objetivo de obtener un registro de las características físicas y mecánicas de los suelos de la provincia de Misiones para optimizar su uso en obras civiles, a lo largo de la rutina de trabajo desarrollada se pudieron alcanzar los primeros datos de interés.

Comenzando por la caracterización de los suelos obtenidos y su posterior trabajo de compactación en el laboratorio de acuerdo a la norma IRAM 10511-1972, podemos elaborar las primeras conclusiones en base a las seis muestras de suelo ensayadas según el Método normal de compactación y su alternativa B.

Como conclusiones generales, como es de esperarse, al variar la energía de compactación todas las muestras presentan una disminución de la humedad óptima y un aumento de la densidad seca máxima.

Más específicamente, 4 de las 6 muestras, no sobrepasan un rango de variación de su humedad óptima del 2%. Las dos muestras restantes, llegan a alcanzar un rango de variación del 5%.

Los registros obtenidos de densidad seca máxima, demuestran que las 4 muestras que presentan un rango de variación en su humedad óptima del 2%, alcanzan un promedio de aumento de su densidad seca máxima del 3% y las dos muestras restantes, un promedio de aumento más relevante, del 6%.

Diferentes correlaciones fueron obtenidas entre las propiedades índices y los parámetros de compactación.

De esta manera, se lograron obtener los primeros registros respecto a la influencia en la variación de la energía de compactación, aplicada a suelos regionales. Se continuará ampliando el estudio, mediante la incorporación de un mayor número de muestras.

Referencias

Bogado G.O, Francisca Franco FM (2016) Comportamiento Tensodeformacional de suelos residuales compactados. Congreso Argentino de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica (CAMSIG). Santa Fé.

Bogado, GO, Reinert, HO, & Francisca, FM (2017). Geotechnical properties of residual soils from the North-east of Argentina. International Journal of Geotechnical Engineering, p.1-10, 2017.

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.

Norma IRAM 10503 " Método de determinación de la densidad relativa de los sólidos y de la densidad de los sólidos de un suelo " - 2007.

Norma IRAM 10507 " Método de determinación de la granulometría por tamizado mediante vía húmeda " - 1986.

Norma IRAM 10509 "Clasificación de los suelos, con propósitos ingenieriles " - 1982.

Norma IRAM10511 "Método de ensayo de compactación en laboratorio"- 1972.