

Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción Interna (ϕ) y su relación con los parámetros densidad relativa (D_r) y relación de vacíos (e) en suelos granulares

Resistance parameter determination, internal friction angle (ϕ) and its relationship with parameters relative density (D_r) and void ratio (e) granular soils

González de Celis, Gioconda*, De Barcia, Esmeralda, Sulbaran, Yosmar, Ucar Navarro, Roberto

Departamento de Vías, Facultad de Ingeniería, ULA.

Mérida 5101, Venezuela

*ggonza@ula.ve

Resumen

Se tiene como objetivo establecer la relación entre el ángulo de fricción interna ϕ , la densidad relativa D_r (índice de densidad I_d) y la relación de vacíos (e) en suelos granulares. Los datos obtenidos de la investigación provienen de suelos de origen sedimentario aluvial y arcilloso correspondientes a la meseta de Mérida-Venezuela, donde se realizaron calicatas en diferentes puntos del área urbana. En la primera etapa se realiza el estudio experimental de cada una de las muestras, teniendo en cuenta la densidad natural del sitio, las propiedades índices del suelo, caracterización del mismo y ensayos como corte directo, densidad relativa y compactación. Se analizan los resultados obtenidos de estudio experimental, relacionándolos gráficamente entre los parámetros obtenidos para observar la similitud con expresiones obtenidas por otros autores como Meyerhof (1956), Cauquot (1969) y Giraudet (citado por Costet J y Sanglerat G, 1975) entre otros. A través de esta se encontró una gran similitud en las ecuaciones aquí obtenidas con los datos experimentales al aplicar el método de los mínimos cuadrados. Cabe destacar que los referidos investigadores realizaron su trabajo con arenas, mientras que en este estudio las muestras son suelos granulares gravosos con un % de finos mayor del 5%. Adicionalmente, se encontraron dos nuevas expresiones que relacionan los parámetros del objetivo principal con las expresiones de masa y volúmenes de la mecánica de suelos. Las ecuaciones obtenidas en esta investigación se sometieron a un análisis estadístico a través del programa de simulación Crystal Ball, con la finalidad de obtener los parámetros más sensibles. Por otro lado, se llevó a cabo una comparación entre la densidad máxima seca obtenida con el ensayo de compactación y la densidad máxima seca obtenida en la mesa vibratoria, resultando que el máximo peso unitario seco al compactarlo por vibración es aproximadamente un 80 % respecto al Próctor modificado.

Palabras Claves: Fricción interna, densidad relativa, relación de vacíos, suelos granulares.

Abstract

It aims to establish the relation between internal rubbing, relative density knows like index density too, and empty relation in granular soils. The dates obtained in the investigation came to soils of origin alluvial sedimentary and argillaceous, corresponding to the plateau of Merida - Venezuela, where made calicatas in different points of urban area. In the first stage it does experimental study of each sample, taking accounting the natural density of site, properties of soil index, soil characteristics and test like direct cut, relative density and compactation. The results obtained with the experimental study are analyzed and relation graphics between the parameters obtained to observe the similitude with expressions obtained for others authors like Meyerhof (1956), Cauquot (1969) y Giraudet (citado por Costet J y Sanglerat G, 1975) and others. The analysis found a big similitude in the equations here obtained with the experimental dates with the method of squares minims. Emphasizing that the investigators did their job with sands, while in this study there are more granular soils with a percentage of fines more than 5%. Additionally using the expressions knowing of mass and volume of soil mechanic and exchanging with the expressions obtain in this study found two new expressions that related the parameters of principal objec-

tive. The equations obtained in this investigation were in a statistics analysis across of simulation program called Cristal Ball, with the finality to obtain the media, standard deviation, variation coefficient, their function of probabilities density, like the parameters more sensitive. There were a comparison between maximum dry density obtain with the compactation test and the maximum dry density obtain by vibration table, obtain like result that the maximum unitary weigh when it was compacted by vibration is approximately a 80 percent respect to modified Proctor.

Key words: Internal friction, relative density, void ratio, granular soils.

1 Introducción

Es de vital importancia poder correlacionar parámetros que faciliten el desenvolvimiento más eficiente de la ingeniería, y que puedan ser utilizados en forma confiable en el diseño de obras civiles, y dentro de intervalos previamente establecidos, al aplicar los conocimientos matemáticos y de estadística.

La estabilidad de los suelos depende en gran proporción a sus propiedades intrínsecas como lo son; el ángulo de fricción interna, su cohesión, el índice de densidad o densidad relativa, y el índice de huecos que tiene la masa suelo. Es de gran aporte poder realizar un vínculo entre ellos que de certeza en la evaluación lógica de estos parámetros, que generarían un aporte de gran importancia para el control de capacidad de soporte en los suelos, en el diseño apropiado de muros de contención y en el de la seguridad al no deslizamiento de taludes.

La intención de esta investigación es dar una pequeña contribución que permita comparar los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorios, con las obtenidas a través de otros investigadores para así tener una correlación de los parámetros estudiados para anteproyectos realizados en la ciudad de Mérida.

El desarrollo del presente estudio tiene la finalidad de correlacionar experimental y analíticamente, algunos de los parámetros que están directamente vinculados a la resistencia de suelos granulares, como lo son el ángulo de fricción interna (ϕ), densidad relativa (D_r), relación de vacíos (e), porosidad (n), entre otras propiedades volumétricas de la mecánica de suelos.

2 Objetivos

- Evaluar la influencia de la relación de vacíos (e) y la densidad relativa (D_r) en la determinación del ángulo de fricción interna (ϕ) en suelos granulares.
- Determinar la relación existente entre el parámetro auxiliar porosidad (n) y el ángulo de fricción interna (ϕ).
- Encontrar ecuaciones matemáticas que permitan correlacionar parámetros como: ángulo de fricción interna (ϕ), relación de vacíos (e), densidad relativa (D_r) en los suelos de la meseta de la ciudad de Mérida, y que puedan ser utilizadas en otros estudios de comportamiento mecánico del suelo que tengan las características de los suelos investigados y dentro de intervalo de valores obtenidos en la investigación.

- Establecer comparación entre las ecuaciones encontradas con otras propuestas por otros autores, así como la comparación con gráficos y ábacos encontrados por otros investigadores.
- Realizar un estudio estadístico de las ecuaciones encontradas con el programa Crystal Ball empleando la técnica de simulación de Monte Carlo, para encontrar parámetros como, la media, desviación estándar, percentiles, coeficiente de variación entre otros.

3 Justificación

La Ingeniería Geotécnica cuando realiza estudios para la implantación de obras civiles tiene, en la mayoría de los casos se apoyan en estudios ya realizados o en estudios experimentales, con el propósito de vincular cualquier tipo de estructura a ejecutar, con la resistencia del suelo. Y es precisamente por ello que se investiga un tópico tan importante de la mecánica de suelos, como lo es el ángulo de fricción interna ϕ y su relación con otros parámetros como la densidad relativa (D_r) y de relaciones volumétricas (relación de vacíos (e) y porosidad (n)).

En tal sentido, muchos autores como Meyerhof 1956, Cauquot 1969 han hecho estudios entre las variables nombradas, los mismos han dado muy buenos resultados, es por ello que conviene indicar que el mismo no es novedoso pero es un aporte más y puede ser aplicado a la meseta de Mérida específicamente.

4 Hipótesis

- El Ángulo de fricción (ϕ) aumenta cuando la relación de vacíos (e) disminuye y aumentando la densidad relativa.
- Al aumentar el porcentaje de finos, el ángulo de fricción interna (ϕ) y la porosidad (n) disminuye.
- La densidad máxima seca ($\gamma d_{máx}$) obtenida bajo la norma (Próctor Modificado T180-D) y la ($\gamma d_{máx}$) obtenida en la mesa vibratoria bajo condiciones del suelo seco están relacionadas a través de la ecuación:

$$(\gamma d)_{máx}^{vibrado} = 0,8 * (\gamma d)_{máx}^{Proctor} \quad (1)$$

5 Antecedentes Históricos

Los tópicos que se siguen en este tipo de investigación tiene diversos factores que determinan la resistencia al

esfuerzo cortante de un suelo granular seco. Estos factores se pueden separar en dos grupos generales; un primer grupo se refiere a aquellos factores que influyen sobre la resistencia al corte de un suelo determinando la relación de vacíos, la presión de confinamiento, la velocidad de carga, etc., y un segundo grupo que incluye aquellos factores que hacen que la resistencia de un suelo difiera de otros factores como el tamaño, la compacidad y la granulometría de las partículas que constituyen el suelo, incluso para la misma presión de confinamiento y relación de vacíos. Sin embargo esta investigación sólo se enfocará en función de la relación de vacíos y la compacidad relativa.

Han sido muchos los trabajos que se han realizado sobre el referido tema, pero siempre limitados bajo condiciones específicas. Así (Camacho 2006), de la Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá-Colombia, en la investigación científica titulada “Anisotropía de esfuerzos y resistencia al corte de arenas” desarrollaron ensayos de laboratorio para estudiar de qué forma pueden relacionar las condiciones anisotropía inducida por esfuerzos, sobre los parámetros de resistencia en arenas. Para ello, se utilizó arena limpia y se controló la distribución granulométrica y la densidad relativa de cada espécimen. En este trabajo, los ensayos se realizaron para una combinación preestablecida de esfuerzos bajo condiciones drenadas. Finalmente cada probeta fue llevada a la falla para obtener los parámetros de resistencia al corte, y los resultados obtenidos muestran variaciones de hasta un 10% en el ángulo de fricción interna, dependiendo de la densidad relativa del material, además, observaron efectos negativos, especialmente en arenas mal gradadas y de densidad relativa media.

Otra de las investigaciones que han estudiado la relación de las diferentes variables que afectan el ángulo de fricción interna es la efectuada por (Rowe 1969), en su investigación titulada “La relación entre la resistencia al esfuerzo cortante de las arenas en compresión triaxial, deformación plana y corte directo”, donde demostró una relación teórica que deriva entre los valores ϕ de Coulomb, para arenas drenadas saturadas medidas en pruebas de corte directo y prueba de compresión de deformación plana usando la ecuación de dilatación-esfuerzo, la hipótesis planteaba que las direcciones del incremento de deformación principal y esfuerzo principal coinciden.

Las medidas de dilatación limitante en compresión triaxial permiten una comparación plena de los valores ϕ que se esperan en estos tres tipos de prueba. Arrojando que los datos experimentales disponibles presentes indican un acercamiento al rango $\phi = 17 - 39^\circ$ para suelos sin adherencia. Por otra parte, los resultados experimentales en los medios incoherentes que se han realizado en arenas en estado seco o con agua, se explicaron bastante bien en el estudio del contacto de sílice sobre sílice, mostrando que en efecto, el agua es un excelente lubricante para ese material y que solamente una pequeña cantidad es suficiente para asegurar esta lubricación.

Ahora bien, en dicha investigación se plantea que una

arena no es jamás químicamente seca; se comprende que en estas condiciones, el ángulo de fricción interno sea igual para una arena húmeda que para una arena seca. Sin embargo, algunos autores como (Terzaghi 1948), indican que los valores obtenidos son inferiores en 1° a 2° en condiciones húmedas.

5.1 Aportes al ángulo de fricción según las características, estados y granulometría del suelo

El ángulo de fricción interno (ϕ) depende esencialmente de factores como la compacidad del material, de la forma de los granos, de su grosor y de la granulometría. En la siguiente tabla, expuesta en el 2do Congreso Internacional de Rotterdam en 1948 por los autores (Costet 1975), donde se precisa el orden de magnitud de la influencia de estos diferentes factores.

Tabla 1. Valores del ángulo de fricción interno de los medios incoherentes, Según Costet J y Sanglerat G, 1975.

$\phi = 36^\circ + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4$			
Compacidad.....	ϕ_1	suelta	-6°
		media	0
		compacta	$+6^\circ$
		aguda	$+1^\circ$
Forma y rugosidad de los granos.	ϕ_2	media	0
		redondeada	-3°
		muy redondeada	-5°
		arena	0
Grosor de los Granos...	ϕ_3	grava fina	$+1^\circ$
		grava gruesa	$+2^\circ$
		uniforme	-3°
		abierto	$+3^\circ$

En la tabla 1, se observa que la compacidad tiene una influencia considerable en la resistencia al corte y por lo tanto, es uno de los aspectos fundamentales al estudiar la resistencia al esfuerzo cortante de las arenas.

5.2 Influencia de la relación de vacíos e y la porosidad n, en el ángulo de fricción interna:

Otro resultado que puede verse en la figura 1 y en las investigaciones obtenidas por Bjerrum (citado por Costet 1975), para una arena fina de granulometría bastante uniforme.

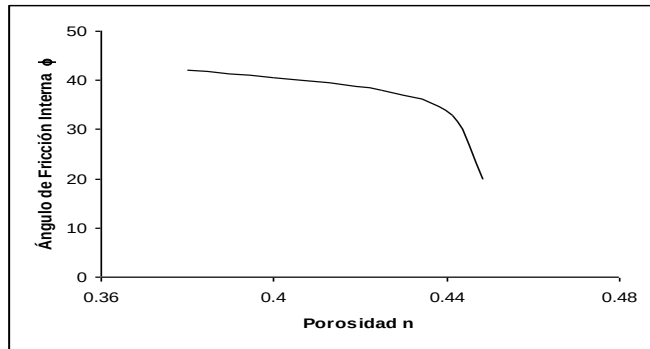


Fig. 1. Variación del ángulo de fricción interno de una arena fina en función de la porosidad.
(Bjerrum, citado por Costet J y Sanglerat G, 1975)

Por otro lado, se han propuesto varias fórmulas empíricas a través de pruebas de laboratorio en los cuales se relaciona $\phi = f(e)$. En este sentido, cabe destacar a Chen (citado por Camacho 2006), quien ha propuesto la siguiente ecuación:

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 * lge \quad (2)$$

Donde ϕ_1 y ϕ_2 están indicados en la tabla 1. ϕ_2 esta en el orden de 60° . Por otra parte citaremos también la de Giraudet:

$$tg\phi = 0,25 + \frac{0,3}{e} \quad (3)$$

En 1969 (Caquot A y Kérisel J, 1969), propusieron una fórmula más sencilla:

$$tg\phi = \frac{K}{e} \quad (4)$$

Dicha ecuación se aproxima bastante bien a los valores reportados en la tabla 1. El valor de K depende de la forma de los granos, de la rugosidad y de la uniformidad de la granulometría. Estos autores indicaron que K varía entre 0,40 - 0,60 y establecen que un valor de 0,55 se ajusta bastante bien en arenas de grano rugoso uniforme.

En la fórmula (4), empleando el valor de K= 0,55 se ha obtenido la tabla 2.

La influencia de la compactación sobre el ángulo de fricción interna en una arena, origina incertidumbre sobre el interés en los ensayos de corte en el laboratorio, debido a que es muy difícil tomar arenas in situ sin alterar su compactación y es además igualmente difícil reproducir la compactación exacta de una capa relativamente profunda.

Los valores de ϕ pueden variar poco, más o menos entre 29° y 48° , comprobándose que los más habituales están comprendidos entre 30° y 40° .

Tabla 2. Valores de $\phi = f(e)$. (Según Caquot A y Kérisel J, 1969)

e.....	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
n.....	0,50	0,47	0,44	0,41	0,38	0,33
ϕ	29°	32°	35°	38°	43°	48°

Parece prudente emplear las recomendaciones del Servicio de Ingeniería Americano que dicen textualmente:

“Generalmente es mejor estimar el valor del ángulo de rozamiento interno, en lo que respecta a las arenas, que ejecutar un número limitado de ensayos sobre gran número de muestras. Es recomendable utilizar en esta estimación el valor de 30° si la compactación es débil y 35° si es fuerte”.

De igual modo, otra correlación de gran utilidad señalada por la NAVFAC (tomado del Lambe y col., 2006), plantea que el ángulo de fricción interna para arenas oscila entre 26° y 45° , variando con la compactación relativa, a través de la cual se puede estimar el valor de ϕ tomando en cuenta diferentes suelos gruesos, como se muestra en la figura N° 2.

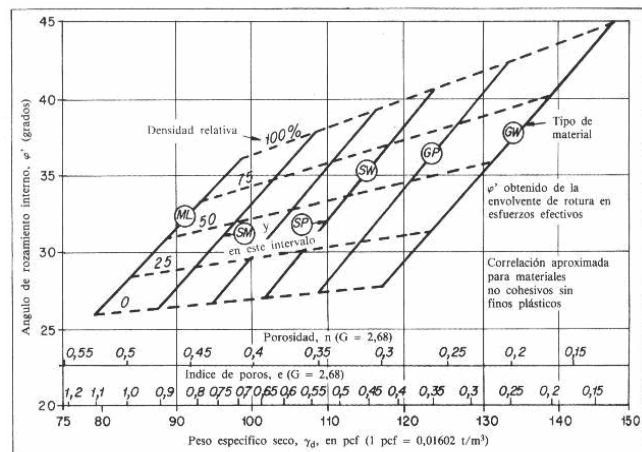


Fig. 2. Relación entre el ángulo de fricción interno efectivo y el peso unitario seco para suelos granulares. Según NAVFAC.
(Tomado del Lambe T y col., 2006)

5.3 Relación entre el parámetro de resistencia y el contenido de humedad:

Teniendo en cuenta la relación que existe entre el parámetro de resistencia y el contenido de humedad, es otro punto importante que es necesario abordar en esta investigación, considerando que el agua sirve de lubricante entre partículas y por ende el desplazamiento entre las mismas. En la investigación realizada por: (Hossne y col., 2003), los autores explican que la resistencia de los suelos agrícolas generalmente han sido evaluados en función de la compactación al medir la densidad sin hacer referencia de la humedad. Este estudio estuvo dirigido en evaluar el cizallamiento a los suelos con diferentes niveles de humedad edáfica (ω) para cada tensión normal (σ) las interrelaciones

con la cohesión aparente (C) y el ángulo de fricción interna de un suelo agrícola. Estos autores usaron como medio experimental para sus muestras la prueba del triaxial encontrando la siguiente expresión:

$$\tau = -0,782\omega + 1,180C + 6,745\phi - 1,152 \quad (5)$$

Observando que la resistencia (τ) aumenta al elevar la tensión normal, pero decrece con la humedad y tiende a cero cuando el estado del suelo se acerca al límite líquido.

La relación encontrada por los referidos investigadores es muy importante porque, aunque se inclina a la Ingeniería Agrícola esta fue obtenida bajo los principios fundamentales de la Mecánica de Suelos, por tanto, dan un aporte importante a estudios relacionados con la capacidad portante y resistente del suelo. Igualmente, la expresión antes descrita servirá como medio para comparar los resultados obtenidos en este estudio.

Por otro lado, (Durán 2002), analizo la deformación y la rotura de un suelo de textura media con 45% de arena, 40% de limo y 15% de arcilla. (Suelos francos aptos para cultivos), y con ayuda de la prueba de corte directo, ensayó muestras a diferentes contenidos de humedad. En su investigación determino la cohesión y el ángulo de fricción interna suelo-suelo, en función de su humedad. Llegando a la conclusión que la humedad tuvo un efecto directo sobre la cohesión. El ángulo de fricción interna suelo-suelo también se ve afectado con el aumento del contenido de humedad observándose el aumento gradual con la humedad hasta el 12 % y luego tiende a disminuir.

5.4 Contribución de otros autores en relación al ángulo de fricción interna ϕ la densidad relativa D_r

Las expresiones de Meyerhof se indican en la siguiente tabla 3.

Tabla 3. Expresiones de Meyerhof [29]

5% arena fina y limo	< 5% arena fina y limo
$\phi = 25 + 0.15D_r\%$	$\phi = 30 + 0.15D_r\%$

Los autores (Giuliani 1982), mediante métodos estadísticos, propusieron:

$$Tg(\phi) = 0,575 + 0.361D_r^{0.866} \quad (6)$$

Por otro lado (Burmister D, 1948), propuso correlaciones entre D_r y ϕ en función de la granulometría del suelo. Las expresiones de este autor se presentan en la tabla N° 4.

Tabla 4. Relación entre D_r y ϕ , según Burmister [7]

Gravilla uniforme	Arena gruesa	Arena media	Arena fina
$\phi = 38 + 0.08D_r\%$	$\phi = 34.5 + 0.10D_r\%$	$\phi = 31.5 + 0.115D_r\%$	$\phi = 28 + 0.14D_r\%$

6 Metodología

Esta investigación de tipo experimental, consiste en la toma de muestras en distintos puntos de la ciudad y luego son ensayadas en el laboratorio. Posteriormente se correlaciona el ángulo de fricción interna en función de D_r , e , y n . La muestra se fundamenta en trece (13) suelos, tomados en campo, mediante el uso de las calicatas, en puntos claves de la ciudad sugeridos por Fundación para la Prevención de Riesgo Sísmico (FUNDAPRIS).

En la tabla 5 se detalla la procedencia de la muestra y los resultados de las pruebas de contenido de humedad ($\omega\%$) y las densidades naturales (γ_d)nat respectivamente.

Tabla 5. Contenidos de humedad y densidad seca natural (ASTM: D 2216 y D 1556 respectivamente)

Ubicación o procedencia	Contenido de humedad natural ($\omega\%$)	Densidad Natural $\rho_{d_{nat}}$ (T/m^3)
El Acuario, Nuevo enlace Frente a C.C Las Tapias	8.85	1.70
Estadium "Luis Fargier" Detrás de la Av Humberto Tejera	9.78	1.83
Via Pueblo Nuevo detrás de la Plaza de toros Roman E. S.	5.87	1.84
Actual C.C El Rodeo Al lado del Banco Mercantil	9.05	1.62
Laboratorio de Hidráulica (ULA) enlace vial de la Cruz verde	8.81	1.90
Conjunto residencial El Rodeo	8.49	1.85
Antigua vía Ejido detrás del la Cuesta del Ciego	6.37	1.93
Estadium Metropolitano (Zumba)	6.83	1.92
Talud detrás de Conjunto Residencial Alto Chama	8.49	1.85
Faces Universidad de los Andes	8.22	1.95
Urbanización Campo claro vía los Curos	7.87	1.95
Talud Urbanización las Tapias *		
Av. los Próceres Al lado de la Estación de servicios BP	13.90	1.83

* Punto eliminado por el Tutor a causa de ser un material de relleno

De igual manera, aplicando el procedimiento para determinar el tamaño de los granos mediante el cribado del material por una serie de mallas con aberturas establecidas. Se determinaron las diferentes curvas granulométricas las cuales se señalan en la tabla 6.

Continuando con los procedimientos de laboratorio basados en las normas ASTM se determinó el límite líquido LL, límite plástico LP e índice plástico Ip y se clasificaron los suelos. En la tabla 7 se presenta el resumen de estas propiedades.

Tabla 6. Granulometría, coeficiente de curvatura y de uniformidad de los suelos en estudio. (ASTM D 422)

Procedencia de la toma de muestra	% G	% S	% F	Cc	Cu
El Acuario, Nuevo enlace Frente a C.C Las Tapias	41.80	30.84	13.96		
Estadium "Luis Fargier" Detrás de la Av. Humberto Tejera	25.40	40.61	10.03	0.3	240
Vía Pueblo Nuevo detrás de la Plaza de toros Román E. S.	48.48	29.55	10.80	1.1	335
Actual C.C El Rodeo Al lado del Banco Mercantil	64.21	27.34	8.45	1.8	220
Laboratorio de Hidráulica (ULA) enlace vial de la Cruz verde	48.10	41.36	10.57	0.5	160
Conjunto residencial El Rodeo	26.34	36.86	25.32		
Antigua vía Ejido detrás del la Cuesta del Ciego	43.46	36.85	7.91	0.6	183
Estadium Metropolitano (Zumba)	24.75	45.10	6.98	0.2	164
Talud detrás de Conjunto Residencial Alto Chama	44.66	31.30	24.04		
Faces Universidad de los Andes	28.86	27.56	17.01		
Urbanización Campo claro vía los Curos	51.01	18.27	10.20	9.6	507
Talud Urbanización las Tapias *			Eliminado		
Av. los Próceres, metros arriba de la Materiales Los Andes	51.11	34.94	14.96	-----	-----

Tabla 7. Valores de los límites de consistencia e índices de plasticidad y clasificación SUCS de los suelos en estudio. (ASTM: D 4318 y D 2487 respectivamente)

Procedencia de la toma de muestra	LI %	Lp %	Ip %	Clasificación según SUCS
El Acuario, Nuevo enlace Frente a C.C Las Tapias	27.75	20.76	6.99	GC
Estadium "Luis Fargier" Detrás de la Av. Humberto Tejera	29.58	19.47	10.10	SP-SC
Vía Pueblo Nuevo detrás de la Plaza de toros Román E. S.	26.24	18.02	8.22	GW-GC
Actual C.C El Rodeo Al lado del Banco Mercantil	22.38	NP	NP	GW-GM
Laboratorio de Hidráulica (ULA) enlace vial de la Cruz verde	27.67	NP	NP	GP-GM
Conjunto residencial El Rodeo	40.39	32.07	8.32	SM
Antigua vía Ejido detrás del la Cuesta del Ciego	23.90	NP	NP	GP-GM
Estadium Metropolitano (Zumba)	28.40	21.33	7.07	SP-SC
Talud detrás de Conjunto Residencial Alto Chama	32.05	18.96	13.09	GC
Faces Universidad de los Andes	25.36	NP	NP	GM
Urbanización Campo claro vía los Curos	32.94	23.12	9.82	GP-GC
Talud Urbanización las Tapias (Eliminado por el tutor)				
Av. los Próceres, metros arriba de la Materiales Los Andes	34.63	21.67	12.95	GC

6.1 Ensayos Especiales:

Siguiendo los procedimientos estandarizados, se determinó la densidad de máxima seca $\rho_{dm\max}$ y el contenido de humedad óptima $\omega_{\text{óptima}}$. En la tabla 8 se presentan estos valores

Tabla 8. Valores de densidad máxima seca ensayados en Próctor modificado de los suelos en estudio. (ASTM D 1557-D)

Procedencia de la toma de muestra	Densidad máxima	
	seca $\rho_{dm\max}$ t/m ³	$\omega_{\text{óptima}}$ %
El Acuario, Nuevo enlace Frente a C.C Las Tapias	2.15	8.0
Estadium "Luis Fargier" Detrás de la Av. Humberto Tejera	2.15	6.4
Vía Pueblo Nuevo detrás de la Plaza de toros Román E. S.	2.20	4.7
Actual C.C El Rodeo Al lado del Banco Mercantil	2.23	4.3
Laboratorio de Hidráulica (ULA) enlace vial de la Cruz verde	2.12	6.4
Conjunto residencial El Rodeo	1.93	10.8
Antigua vía Ejido detrás del la Cuesta del Ciego	2.16	5.8
Estadium Metropolitano (Zumba)	1.98	8.8
Talud detrás de Conjunto Residencial Alto Chama	2.11	6.0
Faces Universidad de los Andes	2.08	7.0
Urbanización Campo claro vía los Curos	2.12	6.0
Talud Urbanización las Tapias (Eliminado por el tutor)	-----	-----
Av. los Próceres, metros arriba de la Materiales Los Andes	2.08	7.0

Con las relaciones volumétricas elementales de la mecánica de suelos y con ayuda de otros parámetros hallados anteriormente se determinó la relación de vacíos natural (en) con el propósito de ser usada en el cálculo de la densidad relativa. Posteriormente con la ayuda del método para medir la densidad relativa o índice de compacidad y con ayuda de la mesa vibratoria, según la norma (ASTM D 4253), se determinó este parámetro objeto de esta investigación. En estas condiciones se estableció la correlación que existe entre el valor promedio de Dr. y el ángulo de fricción interna. En la tabla 9 se indican los valores resultantes, correspondiente a cada sitio de estudio.

Tabla 9. Resultados obtenidos del ensayo de densidad relativa de los suelos en estudio con ayuda de la mesa vibratoria. (ASTM D 4253)

Procedencia de la toma de muestra	e_{nat}	$e_{m\max}$	e_{min}	ρ_{dmin} t/m ³	ρ_{dmax} Próctor modificado t/m ³	Dr %
El Acuario, Nuevo enlace Frente a C.C Las Tapias	0.57	1.02	0.24	1.32	2.15	57.85
Estadium "Luis Fargier" Detrás de la Av. Humberto Tejera	0.42	0.90	0.21	1.37	2.15	69.56
Vía Pueblo Nuevo detrás de la Plaza de toros Román E. S.	0.45	0.80	0.21	1.48	2.20	60.03
Actual C.C El Rodeo Al lado del Banco Mercantil	0.66	0.76	0.20	1.52	2.23	18.95
Laboratorio de Hidráulica (ULA) enlace vial de la Cruz verde	0.43	1.14	0.29	1.27	2.12	83.24
Conjunto residencial El Rodeo	0.45	1.23	0.39	1.21	1.93	93.05
Antigua vía Ejido detrás del la Cuesta del Ciego	0.39	0.98	0.24	1.36	2.16	79.72
Estadium Metropolitano (Zumba)	0.37	1.15	0.33	1.22	1.98	95.28
Talud detrás de Conjunto Residencial Alto Chama	0.43	1.03	0.25	1.30	2.11	77.44
Faces Universidad de los Andes	0.37	0.96	0.29	1.37	2.08	87.14
Urbanización Campo claro vía los Curos	0.37	0.89	0.26	1.41	2.12	82.84
Talud Urbanización las Tapias (Eliminado por el tutor)	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Av. los Próceres, metros arriba de la Materiales Los Andes	0.47	1.00	0.29	1.34	2.08	74.93

En el ensayo de corte directo, se determinaron dos parámetros: la cohesión C y el ángulo de fricción interna ϕ ; en la condición no drenada, no consolidada y no saturada. Para la preparación de las muestras se emplearon cajuelas con dimensiones de (10x10x4) cm³, los resultados se reflejan en la tabla 10.

Tabla 10. Resultados obtenidos del ensayo de corte directo. (ASTM D 3080)

Procedencia de la toma de muestra	Angulo de fricción interna ϕ °	Cohesión C kgf/cm ²	Cohesión C kN/m ²
El Acuario, Nuevo enlace Frente a C.C Las Tapias	38.00	0.13	13.00
Estadium "Luis Fargier" Detrás de la Av. Humberto Tejera	41.24	0.07	7.00
Vía Pueblo Nuevo detrás de la Plaza de toros Román E. S.	42.00	0.05	5.00
Actual C.C El Rodeo Al lado del Banco Mercantil	35.00	0.00	0.00
Laboratorio de Hidráulica (ULA) enlace vial de la Cruz verde	39.38	0.04	4.00
Conjunto residencial El Rodeo	42.92	0.10	10.00
Antigua vía Ejido detrás del la Cuesta del Ciego	43.00	0.06	6.00
Estadium Metropolitano (Zumba)	45.00	0.08	8.00
Talud detrás de Conjunto Residencial Alto Chama	43.00	0.11	11.00
Faces Universidad de los Andes	45.00	0.00	0.00
Urbanización Campo claro vía los Curos	46.00	0.10	10.00
Av. los Próceres, metros arriba de la Materiales Los Andes	41.00	0.10	10.00

7 Análisis de resultados

Una vez realizados las pruebas de laboratorio se correlacionan gráficamente los parámetros estudiados y se comparan con los investigadores anteriormente mencionados. De esta forma se plantean los siguientes aspectos:

7.1 Fronteras de los parámetros de investigación:

En este sentido se ha considerado como referencia los valores máximos y mínimos de los resultados generales de los experimentos realizados en el espacio muestral investigado de la terraza de Mérida. En la tabla 11 se indican las fronteras de los parámetros principales de esta investigación, para ver el alcance de las interrelaciones que aquí van surgir.

Tabla 11. Intervalos recomendados en las correlaciones obtenidas en esta investigación

Relacion de vacios e	Densidad Relativa Dr %	Angulo de fricción interna ϕ°	Densidad máxima seca ρ_{dnat} t/m ³	contenido de humedad $\omega\%$
$0,37 \leq e \leq 0,66$	$18\% \leq \%Dr \leq 95\%$	$37^\circ \leq \phi \leq 43^\circ$	$1,60 \leq \rho_d \leq 1,95$	$5,82 \leq \omega \leq 13,90$

7.2 Correlación entre ángulo de fricción interna y la densidad relativa obtenida experimentalmente:

Muchos autores en sus correlaciones prefieren usar el coeficiente de fricción ($\text{tg}(\phi)$), para correlacionarlo con otros parámetros. En este estudio se plantea la correlación de la misma manera. En la figura 3 se muestra la conducta gráfica de estos dos parámetros. En los datos experimentales de esta tabla, se aplicó un análisis estadístico a través del programa Crystal Ball utilizando la técnica de Monte Carlo.

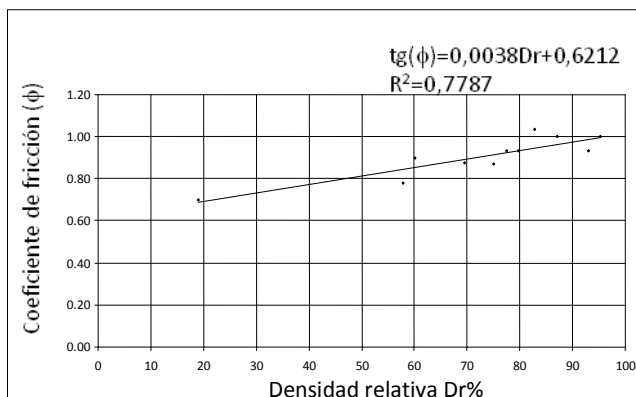


Fig.3. Correlación entre el coeficiente de fricción y la densidad relativa de los suelos de la terraza de Mérida

Como se puede observar en la figura 3, el coeficiente de fricción aumenta a medida que incrementa la densidad relativa tal como era de esperarse, esta relación se puede sintetizar en la siguiente expresión experimental:

$$\text{tg}(\phi) = \left(\frac{0,38\text{Dr}\% + 62}{100} \right) \quad (7)$$

La ecuación antes descrita tiene un coeficiente de correlación $R^2 = 0,78$, valor aceptable. De igual forma se hizo un análisis estadístico a la ecuación 5 con el programa Crystal Ball, tomando en cuenta los intervalos de la densidad relativa que se describen en la tabla 12 en forma tal, de observar algunos valores estadígrafos importantes.

Tabla 12. Análisis estadístico de la ecuación (5) experimental

%Dr min	%Dr nat	%Dr max	Distribución	Media $\text{tg} \phi$	Desviación estándar $\sigma_{\text{tg}\phi}$	Coeficiente de variación $\%Cv_{\text{tg}\phi}$	$\text{tg}(\phi) - \sigma_{\text{tg}\phi}$	$\text{tg}(\phi) + \sigma_{\text{tg}\phi}$	% Certeza ó Confianza
30	40	50	Triangular	0.77	0.02	2.00	0.75	0.79	80
40	50	60	Triangular	0.81	0.02	1.93	0.79	0.83	80
50	60	70	Triangular	0.85	0.02	1.80	0.83	0.87	80
60	70	80	Triangular	0.89	0.02	1.70	0.87	0.91	80
70	80	90	Triangular	0.93	0.02	1.60	0.91	0.95	70
80	90	100	Triangular	0.96	0.02	1.59	0.94	0.98	80

Se puede analizar, según la tabla 12, que el coeficiente de fricción $\text{tg}(\phi)$ aquí encontrado, tiene una desviación estándar de $\sigma_{\text{tg}\phi} \pm 0,02$, indicando que el 80% de los valores de coeficiente de fricción estadísticamente están en el rango de los valores descritos en la mencionada tabla y con un coeficiente de variación de $Cv = 1,8\%$ en términos relativos, obteniéndose un 80% de certeza que el coeficiente de fricción interna ϕ se encuentra en el intervalo:

$$\text{tg}\phi - \sigma_{\text{tg}\phi} \leq \text{tg}\phi \leq \text{tg}\phi + \sigma_{\text{tg}\phi} \quad \text{con} \quad \sigma_{\text{tg}\phi} = 0,02$$

7.3 Comparación de la ecuación experimental Ec.7 con la ecuación de Meyerhof [29] y Giuliani y Nicoll [19]:

Para hacer una comparación de los resultados obtenidos utilizando la ecuación experimental 7 (método de los mínimos cuadrados), se considera la ecuación de (Meyerhof G, 1956), con la finalidad de observar si existen diferencias en los resultados, este autor tiene dos restricciones respecto a su contenido de finos (%pasa 200) en el uso de estas ecuaciones. Una para porcentajes de finos mayores de 5 % y otra para valores menores de 5%, luego se relacionó la

del autor (Giuliani 1982) (Ec. 6) y los resultados se expresan en la tabla 13. Específicamente en este estudio se tomó la ecuación que corresponde a un porcentaje de finos mayores del 5%, ya que se ajusta perfectamente a todos los suelos de la muestra estudiada (ver tabla 6). Evaluando la ecuación 7, la ecuación de (Meyerhof G, 1956) y la de (Giuliani 1982), para diferentes D_r % se obtuvieron los valores de la tabla N° 13 y la figura N° 4.

En la tabla 13, se observa que los valores del ángulo de fricción interna experimental presentan una diferencia mayor respecto a los valores de (Meyerhof 1956), para valores de hasta un máximo de 6°, siendo esta una diferencia notoria de consideración, mientras que los valores experimentales tienen una variación de 2° respecto a la ecuación de (Giuliani 1982), siendo esta diferencia mas aceptable.

Tabla 13. Valores de densidad relativa y ángulo de fricción interna: ecuación de (Meyerhof G, 1956), (Giuliani F y Nicoll F, 1982) y Ecuación 7 (experimental)

Densidad relativa D_r %	Angulo de fricción interna $\Phi_{\text{experimental}}$	Angulo de fricción interna Φ_{Meyerhof}	Angulo de fricción interna $\Phi_{\text{giuliani-Nicoll}}$
10	33	27	32
20	35	28	34
30	36	30	35
40	38	31	36
50	39	33	38
60	40	34	39
70	42	36	40
80	43	37	41
90	44	39	42
100	45	40	43

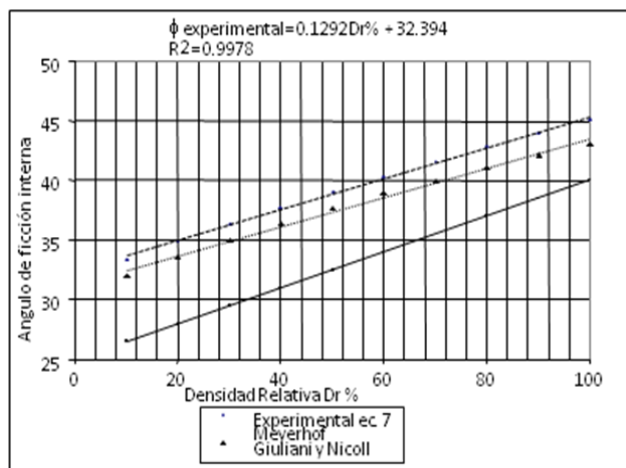


Fig. 4. Relación del ángulo de fricción interna y densidad relativa según Meyerhof 1956, Giuliani y Nicoll 1982 y ecuación 5(experimental)

Al exponer gráficamente estos valores, como se

puede apreciar en la figura 4, las ecuaciones (Meyerhof 1956 Giuliani 1982) y la ecuación experimental, todas tienen una gran similitud en cuanto a la pendiente propuesta por los autores, aunque (Meyerhof 1956) experimentó con arenas un poco más idealizadas. Cabe destacar que en esta investigación se emplearon suelos más integrales en cuanto a proporciones de grava, arena y finos.

La ecuación 7 da un valor del ángulo de fricción interna mayor en aproximadamente 1° para $D_r < 60\%$ y de 2° aproximadamente para valores de $D_r > 60\%$ respecto a la ecuación de (Giuliani 1982), mientras que con la ecuación de (Meyerhof 1956) tiene una diferencia de 5° a 6° para cualquier densidad relativa, pero las mismas en general tienen una gran convergencia.

En este mismo sentido, la ecuación $\phi_{\text{experimental}} = 0,1292D_r + 32,39$ tiene una gran afinidad con la ecuación de (Burmister 1948) de la tabla 4 para arena media, donde la diferencia del ángulo de fricción interna es de aproximadamente 2°.

Comparación de la relación de vacíos, el ángulo de fricción interna de los suelos de la terraza de Mérida y la ecuación propuesta por (Caquot A y Kérisel J, 1969):

Según la ecuación 4, propuesta por (Caquot 1969), en la tabla 2 se determinó que el producto entre el coeficiente de fricción y la relación de vacíos es aproximadamente constante, llamando a dicho factor, K. En el caso investigado se determinó que para los suelos de Mérida el valor recomendado es de $0,37 \leq K \leq 0,43$. Graficando los valores obtenidos en este estudio, con el método de mínimos y máximos cuadrados, se realizó la comparación gráfica según figura 5, entre $\phi_{\text{experimental}}$ y ϕ_{Caquot} con e_{nat} , usando el valor de K igual a 0,40, según se ve:

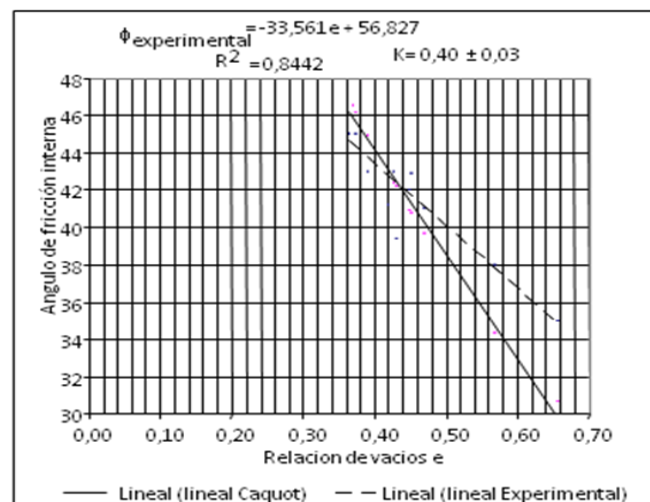


Fig. 5. Correlación del ángulo de fricción interna y la relación de vacíos para valores de $K = 0,40 \pm 0,03$ para valores experimentales y los obtenidos según (Caquot A y Kérisel J, 1969).

La ecuación experimental $\phi = f(e)$ se aproxima bastan-

te bien en la mayoría de los casos con los de (Caquot 1969). La pequeña variación probablemente tenga su efecto en el tipo de suelos usados por los autores que en su mayoría fueron arenas.

7.5 Comparación de la relación de vacíos, el ángulo de fricción interna de los suelos de la terraza de Mérida y la ecuación propuesta por Giraudet:

Analizando al igual que en la sección anterior se puede confrontar la formulación de Giraudet, (tomado de Costet 1975) y la encontrada en esta investigación. En este sentido se hace una regresión del tipo potencial para ambos casos y así graficar los parámetros, con la justificación de que el coeficiente de determinación del autor se ajusta a $R^2 \cong 1$, encontrándose que con este método y los parámetros experimentales también se ajustan mejor a este tipo de análisis, ver figura 6.

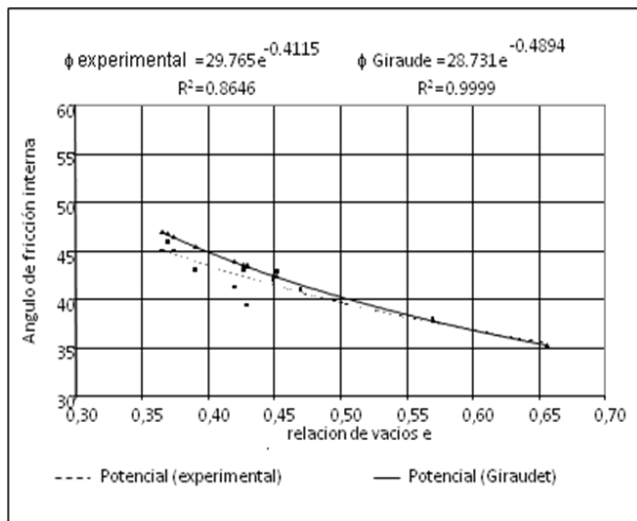


Fig. 6. Correlación del ángulo de fricción interna y la relación de vacíos, según Giraudet (1939) y los obtenidos en esta investigación. (tomado de Costet J y Sanglerat G, 1975)

A través de la ecuación experimental, se observa una gran similitud aunque el ángulo de fricción interna obtenido presenta una disminución respecto a Giraudet (tomado de Costet 1975) en 2° aproximadamente para relaciones de vacíos bajas, al aumentar la relación de vacíos este se va acercando mejor a los valores de la ecuación del autor. Sin embargo la ecuación 7 (experimental) que arroja esta confrontación, se analizó estadísticamente para observar su desviación estándar y afirmar si los 2° de disminución se corresponden a esta desviación. De esta correlación se tiene que:

$$\phi = 29,765e^{-0,4115} \quad (8)$$

La solución obtenida del estudio estadístico de la ecuación

5.1, en forma de intervalos de relación de vacíos, demostró que el ángulo de fricción interna tiene una desviación estándar de $\sigma_\phi \pm 0,65$ con un coeficiente de variación de $C_v = 1,77\%$. En la misma se obtuvo un 65,31 % de certeza que el ángulo de fricción interna ϕ se encuentra en el intervalo:

$$\phi - \sigma_\phi \leq \phi \leq \phi + \sigma_\phi \quad \text{con} \quad \sigma_\phi = 0,65$$

7.6 Correlaciones entre el ángulo de fricción interna ϕ y la porosidad, n :

Otra relación que se determinó en esta investigación es la variación de ángulo de fricción interna de los suelos en estudio y su porosidad, que es otro parámetro de medición importante en la Mecánica de Suelos. Teniendo en cuenta la relación entre e y n , se puede correlacionar $\phi = f(n)$, tal como se muestra en la figura 7 y poder comparar con los trabajos realizados por (Cornforth 1964).

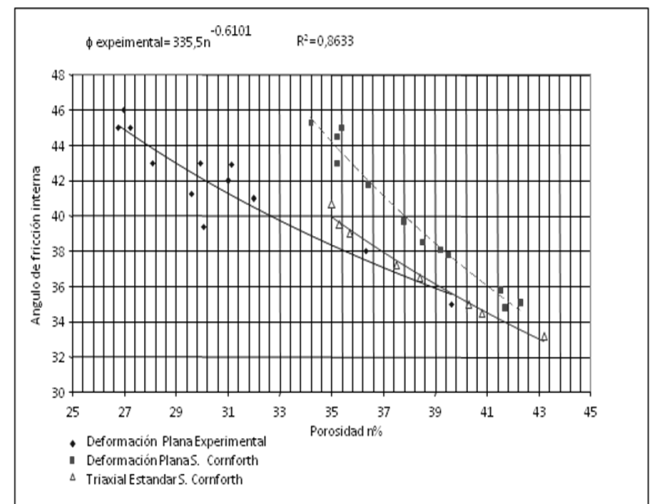


Fig.7. Correlación entre el ángulo de fricción interna y la porosidad. Según: (Cornforth D, 1964) y los obtenidos en esta investigación

Como se puede ver en esta ocasión, la curva experimental se desplaza hacia la izquierda en una buena proporción debido al porcentaje de finos presentes en el espacio muestral de esta investigación que hacen que la porosidad de las mismas disminuya, a diferencia de los trabajos que realizó (Cornforth 1964), que fueron para pruebas en arenas mas gruesas donde la porosidad es mayor debido a la falta de finos que puedan llenar los espacios vacíos del suelo.

De igual forma, se observa una convergencia entre las distintas curvas, lo que conlleva a una nueva ecuación (9), con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.8633$ siendo este un valor bastante aceptado.

$$\phi = 335.5n^{-0,6101} \quad (9)$$

Para este caso, se realizó un reporte estadístico, tomando en cuenta que la desviación estándar de la porosidad es de $\sigma_n \pm 3.89$ con un coeficiente de variabilidad de 12.55 %. En el análisis de distribución triangular por rangos de porosidad, de dicha ecuación, la desviación estándar del ángulo de fricción interna en función de su porosidad es aproximadamente de $\sigma_{\phi n} \pm 1,3$ y un coeficiente de variación $C_v = 3,38$ %, observándose además un 65,28 % de certeza que el ángulo de fricción interna ϕ se encuentra en el intervalo positivo:

$$\phi - \sigma_{\phi} \leq \phi \leq \phi + \sigma_{\phi} \quad \text{con} \quad \sigma_{tg\phi} = 1,3$$

7.7 Influencia de la humedad sobre el parámetro de resistencia:

Parece lógico pensar que cuando en el suelo se aumenta su contenido de humedad la resistencia al esfuerzo cortante se vea afectada, y quizá en los suelos más superficiales que no están influenciados por una presión de confinamiento. Los parámetros correlacionados fueron: el ángulo de fricción interna ϕ , humedad ω , la cohesión c y la densidad natural (γ_d) que están muy íntimamente ligada a la humedad. Esta correlación múltiple deriva en la ecuación 10 con una media muestral de $40,93^\circ$ y desviación estándar $\sigma_{\phi} \pm 2,71$, con un coeficiente de variación $C_v = 6,62\%$, el intervalo de la cohesión sería: $0 \leq C \leq 0,13$.

$$\phi = 1,56C + 26,76\gamma_d - 0,187\omega - 7,14 \quad (10)$$

Para esta ecuación se obtuvo un 66,59 % de certeza que el ángulo de fricción interna ϕ se encuentra en el intervalo:

$$\phi - \sigma_{\phi} \leq \phi \leq \phi + \sigma_{\phi} \quad \text{con} \quad \sigma_{\phi} = 2,71$$

Observando la ecuación 10 en forma lineal, se distingue numéricamente cual es la influencia de cada parámetro. Pero con ayuda del programa Crystal Ball se determinó la mayor sensibilidad de cada uno de los parámetros que la componen, donde el contenido de humedad y la cohesión no juegan un papel predominante en la obtención del parámetro de resistencia ϕ , mientras que la densidad tiene un 96,6 % de influencia sobre esta ecuación.

8 Conclusiones

Una vez aplicado el instrumento de recolección de datos, procesados los mismos y obtenida la información que de ello se generó conjuntamente con los respectivos análisis

se obtuvieron las siguientes conclusiones.

- En relación a la influencia de la relación de vacíos (e) y la densidad relativa (D_r) en el parámetro de resistencia (ϕ) se pudo corroborar la hipótesis que el ángulo de fricción interna (ϕ) aumenta cuando la relación de vacíos (e) disminuye y la densidad relativa aumenta. En este mismo sentido la ecuación experimental 7, marca la tendencia de los valores de (ϕ) al aumentar la densidad relativa. Dicha ecuación permite determinar en los suelos de Mérida el parámetro de resistencia con una desviación estándar de $\sigma_{tg\phi} \pm 0,02$ que es equivalente $\sigma_{\phi} \pm 1.15$ con un nivel de certeza de 80%. Al comparar la mencionada ecuación con la de (Meyerhof 1956), (Giuliani y Nicoll 1982), se afirma que la misma se acerca mas por debajo a la de este ultimo autor con una diferencia de 2° siendo esta aceptable para su uso.
- En este mismo orden de ideas, en cuanto a la relación del parámetro de resistencia (ϕ) con la relación de vacíos (e), los valores encontrados se ajustan bastante bien a los propuestos por (Caquot 1969) donde el valor de K en los suelos de la meseta de Mérida queda calibrado para $K = 0,40 \pm 0.03$.
- En cuanto a la ecuación 8, los valores aquí encontrados tienden a ser muy parecidos a los propuestos por (Giraudet, citado por Costet 1975) con diferencia de $\pm 2^\circ$ para relaciones de vacíos bajas, en cambio cuando las relaciones de vacíos son mayores de 0,55 los valores tienden a ser iguales a los del autor antes mencionado.
- Considerando la porosidad n de los materiales, se aprecia la reducción del ángulo $\sigma_{\phi n}$ al aumentar esta propiedad. Los resultados obtenidos con la ecuación 10, se compararon con los obtenidos por (Cormforth 1964), observándose una convergencia pero con un desplazamiento notorio hacia la izquierda de la grafica como consecuencia del porcentaje de finos de los suelos aquí estudiados, que hace que la porosidad baje notoriamente.
- Conviene no insistir en realizar el ensayo de densidad relativa en los suelos investigados ya que no hay conformidad con los resultados, ya que su porcentaje de finos es mayor de 10% en casi la mayoría de los suelos, puesto que según Lee y Singh cuando la compacidad relativa CR es 80% en suelos granulares la D_r es aproximadamente 0% y esto no se cumplió en lo expuesto en la hipótesis de esta investigación, en cuanto a la comparación entre la densidad obtenida en el ensayo de Próctor Modificado y la obtenida por vibrado en la mesa vibratoria.

9 Recomendaciones

En función de las conclusiones que resultan de esta investigación, se plantea un conjunto de recomendaciones con el fin de validar con mayor peso algunos de los resultados obtenidos, y por otro lado ampliar esta interesante investigación. Entre las sugerencias que se consideran como fundamentales, se tiene:

- La aplicación de las ecuaciones encontradas deben ser usadas para los tipos de suelo encontrados en casco de la ciudad de Mérida con porcentaje de finos mayores del 5 %.
- La calibración del factor K en los suelos objeto de este estudio obtenido con la propuesta de (Caquot A y Kerisel J, 1969), pueden ser mejor calibrados con un espacio muestral mayor, tomar en cuenta la composición granulométrica y así trabajar con mayor certeza.
- Es de vital importancia tomar en cuenta en una próxima investigación de este tipo, la influencia del coeficiente de uniformidad y de curvatura del suelo y así poder resaltar la influencia de la forma y tamaño de los granos en la determinación del parámetro de resistencia.

Referencias

- Arquie G, 1972, Compactación en Carreteras y Aeropuertos, Eta, España.
- Arredondo F, Gimenez F, Jimenez J, Llmazares O, De Navacerrado G y Sendin M, 1977, Compactación de terrenos: terraplenes y pedraplenes, Eta, S.A. Barkan D, 1962, Dynamics of Bases y Foundations, Editorial McGraw-Hill Company, INC.
- Bowles J, 1982, Propiedades Geofísicas del los suelos, Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, S.A, España.
- Braja MD, 2006, Principio de Ingeniería de Cimentaciones, Editorial Edamsa Impresiones, S.A., México D.F.
- Bromwell L, 1966, The Friction of Quartz in High Vacuum. Se, D Thesis, M.I.T., Cambridge, Mass.
- Burmister DM, 1948, The Importance and Practical use of Relative Density in Soil Mechanics, ASTM, Vol 48, Philadelphia.
- Cabello O, 1969, Estudio Geomorfológico del area de Mérida y sus Alrededores, Escuela de Geografía, Universidad de los Andes, Mérida – Venezuela.
- Camacho J F, 2006, Anisotropía de esfuerzos y resistencia al corte de arenas, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia,
- Caquot A, Kerisel J, 1969, Tratado de Mecánica de Suelos, Madrid, España.
- Cornforth D, 1964, Some Experiments on the Influence of Strain Condition on the Stregth of Sand, Geotechnique, Vol. 16, p. 193.
- Costet J, Sanglerat G, 1975, Curso practico de Mecánica de Suelos. Ediciones Omega, S.A. Barcelona - España.
- D'Appolonia J, 1967, Determination of the Maximun Density of Cohesionless Soils, Proc. 3 rd Asian Conf. Soil Mechanics Foundation Engeniene, Volumen 1.
- Deresiewicz H, 1958, Mechanics of Granular Matter, Advances in Applied Mechaniss, Vol 5, Academic Press, New York.
- Dickey J, 1966, The Friction of Quartz in High Vacuum. Se, D Thesis, M.I.T, Cambridge, Mass.
- Escobar DA, Mendoza LA, 2001, Escritura de un programa de computador para calcular la energía de compactación de los compactadores vibratorios, Bogotá, D.C.
- Duran HM, 2002, Efecto de la humedad en la resistencia mecánica de un suelo franco, Universidad Autónoma Chapingo México, Red de Revistas Científicas de America Latina y el Caribe.
- FIUBA, 2009, Resistencia al Corte en las Arenas, Buenos Aires Argentina,
- Giuliani F, Nicoll FL, 1982, New Analytical Correlations Between SPT, Overburden Pressure and Relative Density, Proc 2th. Europ. Symp on Penetration Testing, Amsterdam.
- Hossne G, Santaella E, Malaver J, 2003, Resistencia terramecánica en función de la humedad edáfica de un suelo ultisol de la sabana del estado Monagas, Universidad de Oriente, Venezuela.
- Juárez B, Rico R, 1975, Mecánica de suelos, Tomo I y II Fundamentos de la Mecánica de suelos, Editorial Limusa, México.
- Kyle R, Clayton R, Mikesell R y Blaise B, 2005, Drille Side Frition in gravel soils, Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering.
- Lambe TW y Whitman RV, 2006, Mecánica de Suelos, Editorial Limusa S.A. México.
- Leslie D, 1963, Large Scale Triaxial Tess on Gravelly Soils, Proc. 2 nd Pan Am. Conf. Soil Mech. Found. Eng. Brasil.
- Lobo GS, Vallejo LE, 2005, Discrete Element Method Evaluation of Granular Crushing Under Direct Test Conditions, Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering.
- Ludeña LP, 1971, Variabilidad espacial del ensayo de Penetración estándar en los sedimentos volcánicos del subsuelo en el centro-norte de la ciudad de Quito, Perú.
- Meyerhof G, 1956, Penetration Test Bearing Capacity of Cohesionless Soils, Jour. Geotech. Eng. Div., ASCE vol. 82, SMI.
- Murray RS, 1982, Estadística, Editorial McGraw-Hill Latinoamericana, SA, España.
- Peck RB, Hanson JB, Thornburn S, 1974, Foundation Engineering, 2da Edition, John Wiley an Sons, New York.
- Rowe PW, 1969, La relacion entre la resistencia al esfuerzo cortante de las arenas en compresión triaxial, deformación plana y corte directo, Geotecnique 19 N° 75-86.
- Royo JA, Rabanaque G, 1999, Análisis de Vibraciones e Interpretación de Datos, Universidad de Zaragoza, España.
- Sievers W, 1888, Die Cordillere von Mérida, nebst Bemerkungen über das Karibische Gebirge. Geogr. Abhandl. Penck.
- Terzaghi K, Peck R, 1948, Soils Mechanics in Engineering Practice. Ed. John Wiley and Sons, New York.
- Ventura EJ, 1970, Resistencia al Esfuerzo Cortante de los Suelos, Editorial Dossat, S.A. Madrid

Recibido: 10 de abril de 2013

Revisado: 12 de julio de 2014

González de Celis, Gioconda: Ingeniero Civil, Profesora Asociado de la Universidad de Los Andes, Magister en Ingeniería Vial, Especialista en Pavimentos. Amplia experiencia en proyectos, asesorías y control de calidad en movimiento de Tierra, concreto y asfalto.

De Barcia, Esmeralda: Ingeniero Civil, Profesora Agregado de la Universidad de Los Andes, Magister en Ingeniería Vial, Amplia experiencia en proyectos, asesorías, control de calidad en movimiento de Tierra y estudios de suelos. Correo electrónico: dbarcia@ula.ve

Sulbaran, Yosmar: Ingeniero Civil, estudiante de la Maestría en Ingeniería Vial en la Universidad de los Andes, Supervisor del laboratorio de Mecánica de suelos y Pavimentos de la ULA. Docente en el área de vialidad en la Universidad Politécnica territorial de Mérida "Klever Ramírez". Correo electrónico: syosmar@hotmail.com

Ucar Navarro, Roberto. Ingeniero de Minas U.C.V. Magister en Mecánica de rocas y explosivos (U.S.A). Profesor Titular jubilado de la ULA. Asesor e investigador en taludes. Premio Nacional de Ingeniería (1990), Mención Honorífica Fundacite – Mérida (1993). Orden Tulio Febres Cordero segunda clase (1993). Correo electrónico: robertoucar@cantv.net