

LA DENSIDAD SECA COMO PROPIEDAD ÍNDICE DE LOS SUELOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL GRADO DE ESTABILIDAD EN TALUDES Y LADERAS

OCETE RUIZ, Isidro. Ldo. C. Geológicas. D.E.A. Ingeniería Civil. Geotécnica del Sur, S.A.
HERNÁNDEZ DEL POZO, J. Carlos. Dr. ICCP. Universidad de Granada.
RUBIO GARCÍA, Francisco. ICCP. D.E.A. Ingeniería Civil.
HERNÁNDEZ GARVAYO, J. Carlos. ICCP. D.E.A. Ingeniería Civil. Geotécnica del Sur, S.A.

RESUMEN: En este trabajo se presenta la correlación existente entre la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, medidos en tensiones efectivas de pico, deducidos de ensayos de corte directo sobre pastillas obtenidas a partir de muestras inalteradas de una extensa área del Sur-Sureste Español, correspondientes a suelos coherentes o de transición, y realizado con un total de 2690 muestras ensayadas. Es interesante señalar que la correlación que se presenta no habría podido fundamentarse sin la incorporación de un indicador, en nuestro caso la densidad seca de los materiales investigados. De cualquier forma, queda demostrada la tendencia o regresión entre el citado ángulo de rozamiento interno y la cohesión, dado que los coeficientes de correlación son suficientemente altos como para confiar en su fiabilidad estadística. Presentamos un ábaco de triple entrada que liga la cohesión, el ángulo de rozamiento interno y la densidad seca con la intención de que pueda usarse en evaluaciones de parámetros geotécnicos de corte de forma extendida en los materiales que aquí definimos, independientemente de su localización geográfica. Como corroboración a todo lo dicho se adjunta una evaluación del método, realizada con datos externos a nuestro trabajo.

1 INTRODUCCIÓN

Las propiedades del suelo, de las rocas y de los macizos rocosos se cuantifican mediante parámetros geotécnicos que se usan en los cálculos de cualquier proyecto de obra civil. Éstos se establecen a partir de los resultados de los ensayos de campo y laboratorio.

Muchos parámetros del suelo no son constantes, sino que dependen de distintos factores como el nivel tensional, el modo de deformación, etc.

Los programas de ensayos deben incluir un número suficiente de éstos que proporcionen datos sobre el valor y variaciones de los distintos parámetros que son importantes para el proyecto en cuestión.

En muchos casos, por imposibilidad física o por la propia naturaleza de los materiales, es necesario recurrir a la definición de parámetros mediante correlaciones a partir de otro tipo de indicadores.

Evidentemente siempre que se disponga de estas correlaciones, deben ser fehacientemente contrastadas. Dichas correlaciones deben presentar un sólido fundamento teórico y una clara base empírica de investigación a partir del mayor número posible de ensayos.

Históricamente, las correlaciones a partir de las propiedades índices de suelos han sido ampliamente investigadas al objeto de determinar sus propiedades resistentes.

El trabajo que se plantea viene a completar y ampliar a aquellos realizados hasta este momento, pero tratando de no ser una correlación mas que ligue puntualmente series de valores de ensayos. Pretendemos aproximar la relación existente entre la propiedad índice de la densidad seca y su clara influencia sobre los parámetros resistentes de los suelos, la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, y su aplicación a la definición de la estabilidad de taludes y laderas.

Partimos de que la densidad seca debe de condicionar directamente la resistencia al corte de los suelos sobre la base de que es indicativa del estado de compacidad, sin olvidar incluso, que puede ser igualmente indicativa de su historia tensional.

El campo geotécnico de aplicación está determinado por lo que hemos definido como suelos de "transición", entendidos como aquellos que presentan a la vez cohesión y ángulo de rozamiento interno, según la ley de Mohr-Coulomb.

El método planteado de estudio pretende como fin último establecer un gráfico de triple entrada cuyas variables establecidas sean:

Cohesión «» Angulo de rozamiento interno «» Densidad seca

Independientemente de la relación planteada, se pretende acotar la variación de los parámetros resistentes de los suelos de transición, siempre estudiados desde un punto de vista empírico.

Este empirismo nace de la existencia de un volumen total de 2690 muestras, con más de quinientos ensayos de corte directo que han puesto de manifiesto los parámetros resistentes de corte medidos en valores efectivos de pico.

2 ENTORNO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO. UBICACIÓN DE ENSAYOS

El grueso de los ensayos que constituyen este estudio, provienen de muestras tomadas de las regiones de Andalucía y Valencia, en el Sur y Suroeste de la Península Ibérica..

El entorno geológico está definido por el marco de las Cordilleras Béticas, entendido como el conjunto de montañas que ocupan prácticamente todo el Sur de España. Sin embargo, en sentido geológico, se extiende más allá de los límites geográficos, prolongándose hacia el Sur por debajo del mar de Alborán y hacia el Noreste parte de sus estructuras se continúan sin interrupción por el fondo del Mediterráneo y del promontorio balear hasta la isla de Mallorca.

La Cordillera Bética, junto con la Cordillera del Rif del norte de África, forman el segmento más occidental del orógeno alpino mediterráneo. Estas dos cordilleras se encuentran actualmente separadas por la cuenca neógena de Alborán y se localizan entre dos zócalos hercínicos, el Ibérico al norte y el africano al sur (figura 1).

Los criterios petrológicos y estructurales, han llevado a distintos autores a distinguir tanto en la Cordillera Bética como en el Rif dos grandes zonas o dominios diferenciados y separados por un contacto tectónico, que tienen además un origen paleogeográfico distinto:

a.- Dominio Sudibérico o Zonas Externas.

Están formadas por materiales mesozoicos y cenozoicos cabalgados y plegados sin metamorfizar, que se corresponden con los sedimentos de la cuenca marina que existía.

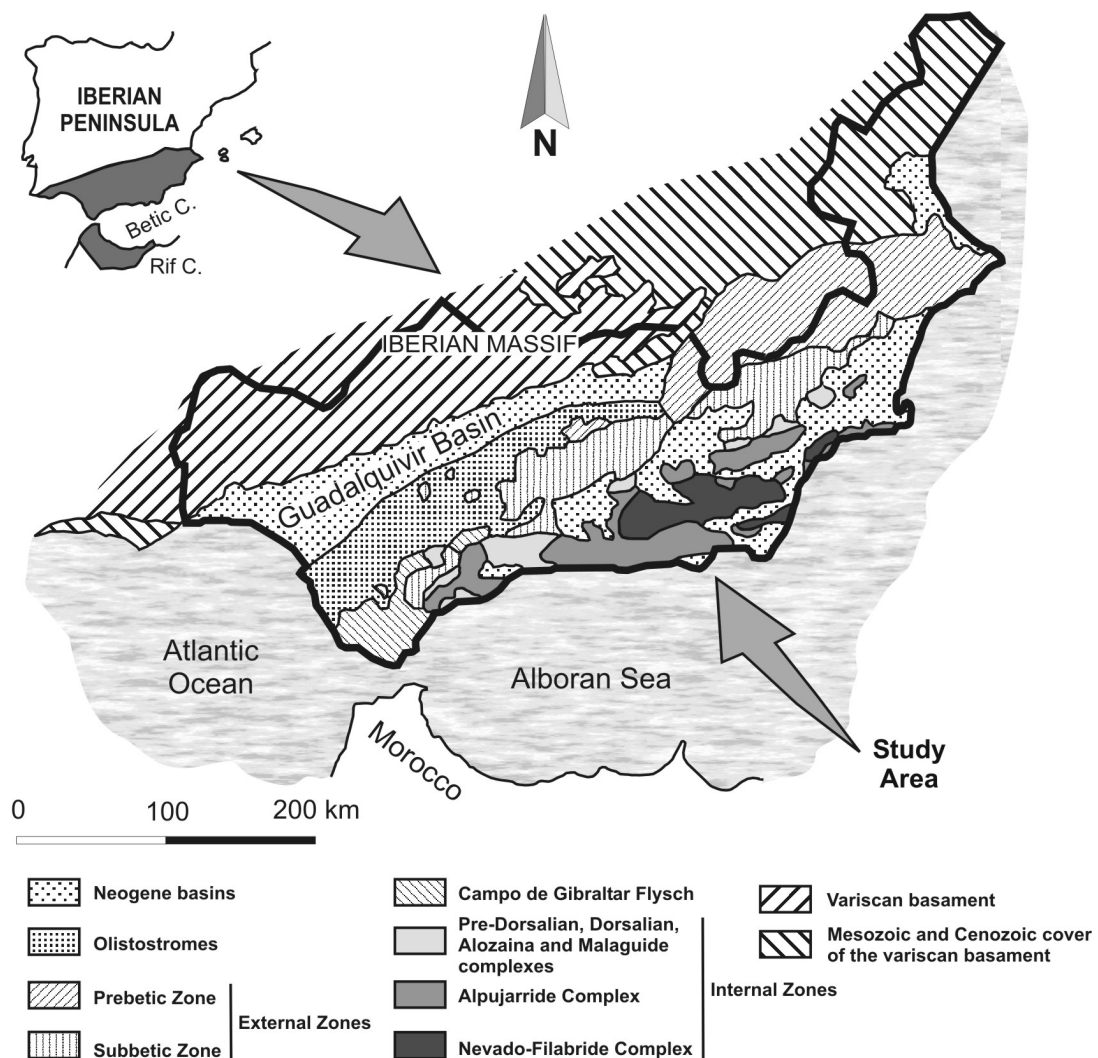


Figura 1. Mapa geológico del área estudiada.

b.- Dominio de Alborán o Zonas Internas.

Compuesto por un apilamiento de mantos de corrimiento con materiales esencialmente metamórficos.

Además de estas dos grandes zonas existen otras áreas como son:

Surco de los Flyschs del Campo de Gibraltar, al que no se le atribuye la entidad de "dominio" por desconocerse el tipo de corteza sobre la que se sitúa. Es común a ambas cordilleras, continuándose a ambos lados del Estrecho de Gibraltar.

Depresiones terciarias postorogénicas. Están rellenas de materiales neógeno-cuaternarios, producto de la erosión de los relieves circundantes. Se diferencian cuencas marginales a la cordillera y otras intramontañosas

Vulcanismo neógeno-cuaternario que corresponde a manifestaciones volcánicas postorogénicas relacionadas con la tectónica reciente.

En total se ha partido de un total de 2690 muestras, de las cuales se posee un total de 15.641 valores o cuantificaciones geotécnicas, que entendemos suficientemente representativos (figura 2).

Los ensayos con los que se ha contado para la realización del trabajo han sido los siguientes:

- Granulometría por tamizado 2690 ensayos
- Determinación de los Límites de Atterberg 2690 ensayos
- Determinación de la humedad 1065 ensayos
- Determinación de la densidad natural 1149 ensayos
- Determinación de la densidad seca 1168 ensayos
- Compresión simple 1078 ensayos
- Corte directo 542 ensayos
- Valor de golpeo de inalterada 896 ensayos

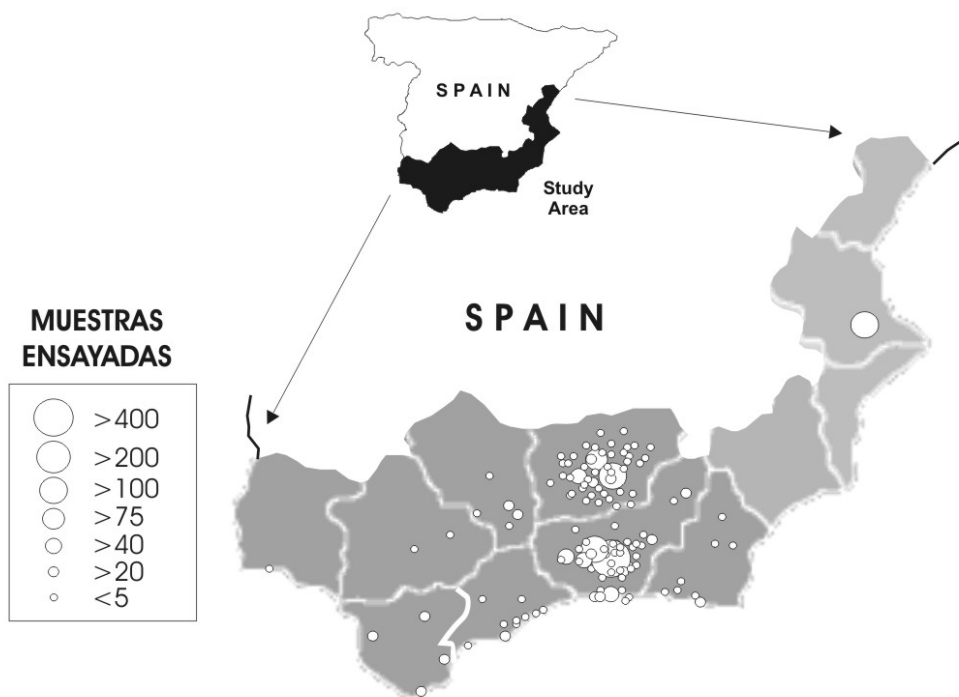


Figura 2. Distribución de las muestras ensayadas.

3 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS PRINCIPALES DE LOS MATERIALES ESTUDIADOS.

Se acepta internacionalmente que la resistencia al corte de un suelo es la tensión de cizallamiento en el plano y en el momento de falla.

Los primeros estudios sobre la resistencia al corte de los suelos fueron efectuados por el ingeniero francés C. A. Coulomb (1736-1806).

Coulomb, en una primera idea, atribuyó este fenómeno a la fricción producida entre las partículas de suelo, y mediante un concepto de mecánica estableció que:

$$F = \mu \times P$$

donde:

P: Fuerza normal

μ : Coeficiente de fricción

F: Fuerza de fricción

Esta ecuación establece que la fuerza necesaria para producir un deslizamiento se encuentra directamente relacionada con la fuerza normal mediante un factor de proporcionalidad " μ " denominado coeficiente de fricción.

Generalizando se tiene que, dada una masa de suelo y un plano potencial de rotura, el esfuerzo de corte que puede resistir la masa de suelo por unidad de área es proporcional al valor de σ (presión normal en dicho plano).

De este modo se obtiene que:

$$\tau = \sigma \times \tan \phi$$

La constante de proporcionalidad $\tan \phi$, fue definida por Coulomb en términos de un ángulo al que denominó ángulo de fricción interna.

Analizando la ecuación se deduce que para $\sigma = 0$, $\tau = 0$, pero Coulomb observó que existían materiales que sin presiones normales aplicadas sobre el plano de corte, presentaban una cierta resistencia al cizallamiento. Para estos suelos consideró una nueva constante que denominó cohesión (del latín "cohere": pegajoso):

$$\tau = c$$

Como en general los suelos presentan un comportamiento mixto, Coulomb determinó que la resistencia de éstos debía expresarse como la suma de ambos comportamientos: la resistencia debida a la fricción interna y la resistencia debida a la cohesión. Así estableció lo que hoy se denomina Ley de Coulomb:

$$\tau = c + \sigma \times \tan \phi$$

donde c es la cohesión.

Los suelos que se modeliza en este trabajo son aquellos que participan de valores de ángulo de rozamiento interno y cohesión, para oponerse al corte.

No consideramos, por consiguiente, los suelos puramente friccionales o no cohesivos, que cumplen la relación $\sigma \times \tan \phi$, ni los puramente cohesivos que responden al esquema $\tau = c$.

Se pretende no establecer limitación en cuanto a la procedencia geológica de los materiales ensayados, al objeto de abarcar la mayor cantidad posible de litologías, tratando de universalizar el modelo propuesto.

Del mismo modo que en el caso anterior, no se ha descartado ninguna muestra sobre la base de sus características geotécnicas, salvo la propia referida a sus valores de ángulo de rozamiento interno y cohesión.

4 CONDICIONES DE LOS SUELOS Y PARÁMETROS

La gran mayoría de las muestras ensayadas se pueden clasificar como limos y arcillas inorgánicas de baja plasticidad, donde gran parte participan de la doble nomenclatura. En menor proporción se cuantifican las arcillas inorgánicas de alta plasticidad y finalmente y con menor representación se obtienen limos inorgánicos de alta plasticidad.

Es muy interesante dejar constancia del hecho de que el índice de fluidez presenta en todos los casos valores próximos a cero o incluso ligeramente negativos, por mantenerse las humedades próximas al límite plástico.

Así mismo, hemos podido comprobar que los suelos estudiados tienen un límite de porcentaje de carbonatos que se puede situar entorno al 10%.

Se trabaja, desarrollando los resultados de una selección de ensayos de corte directo lento, variando el peso específico de las partículas sólidas entre 2.68 y 2.71 g/cm³.

5 METODOLOGÍA

Reflexión previa.- La elección de los parámetros intrínsecos de los suelos, que correlacionan la capacidad de resistir con las tensiones normales (c , ϕ), para introducirlos en los cálculos de capacidad de carga o de evaluación de empujes del terreno, es muy delicada en terrenos coherentes. Partiendo de la conocida expresión:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg} \phi$$

obtendríamos una correlación lineal entre c y ϕ , suponiendo que la tensión normal, como ocurre en la realidad, permanece constante para cada situación y la tensión tangencial es función de las propiedades índice del suelo, en nuestro caso el índice de poros y la humedad, bien directamente o a través de algunos de sus parámetros asociados.

Dicho así, podríamos expresar:

$$f(c, \phi) = \lambda(e, w)$$

Siendo e el índice de huecos y w la humedad del suelo.

Si suponemos que el peso específico de las partículas sólidas permanece a efectos prácticos invariable y que el índice de fluidez se mantiene como un indicador neutro (dado que sus valores son prácticamente constantes en las proximidades del cero), podríamos deducir que la expresión anterior se transforma en:

$$f(c, \phi) = \lambda(\gamma_{\text{seca}})$$

El resultado de esta expresión sería un haz de funciones relativamente paralelas, situadas en el primer cuadrante y con pendiente negativa. Debe ser un valor universal para estos suelos, con las limitaciones que les hemos impuesto deducidas de la experimentación, donde su ordenada en el origen será una función de la densidad seca, entendiendo que esta

ordenada corresponde al valor del ángulo de rozamiento interno cuando la cohesión es nula para la misma familia de densidades.

Ensayos.- Además de los ensayos habituales de límites de Atterberg, densidad de las partículas sólidas, densidad seca de las muestras y humedad natural, se han medido en la máquina de corte directo las tensiones tangenciales para tensiones normales de 100, 200 y 300 kpa., haciendo hincapié que los valores que se presentan son de pico.

6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para comprobar la relación existente se han representando los valores obtenidos para los ensayos de corte directo con respecto a la cohesión, ángulo de rozamiento y su variación con el parámetro índice de la densidad seca.

Se representan, en la figura 3, los valores de ángulo de rozamiento interno y cohesión.

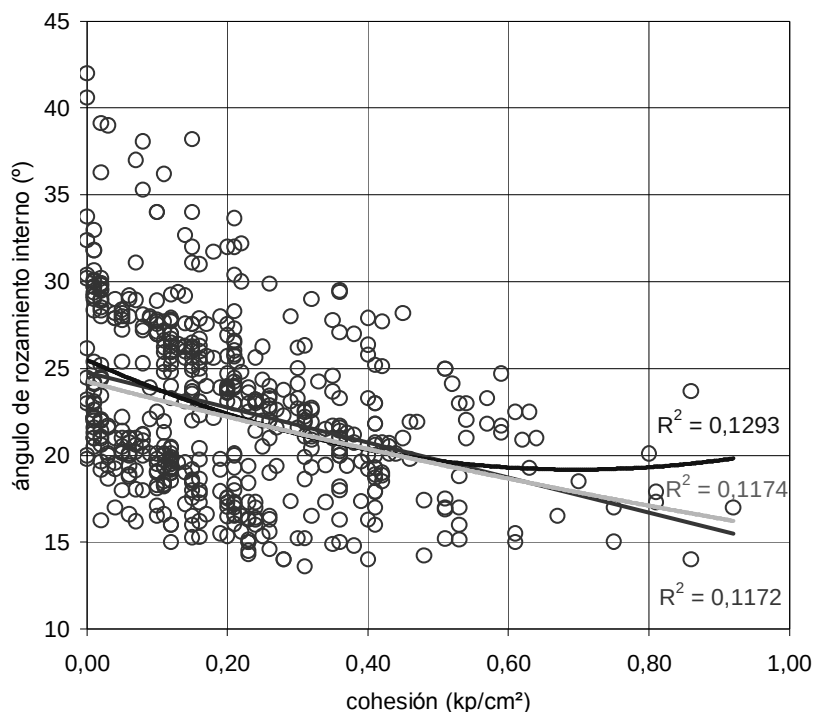


Figura 3. Diferentes regresiones o tendencias efectuadas.

Las regresiones o tendencias que se han planteado, al objeto de determinar algún tipo de aproximación que pretendan correlacionar ambos valores, como términos independientes, han resultado infructuosas.

La mejor aproximación conseguida se ha obtenido según una regresión polinómica, pero claramente insuficiente con $R = -0.36$ (figura 3).

Este hecho era de esperar, ya Thornburn (1963) cita la necesidad de buscar un indicador para los ensayos de corte, usando el índice de densidad para materiales constituidos por arenas limosas flojas. Gibbs y Holtz, (1957) lo ponen de manifiesto en función de la presión vertical, sin llegar a correlacionar los parámetros de cohesión y ángulo de rozamiento.

Continuando con el criterio propuesto se han ordenado los valores de los ensayos de corte directo con respecto a la propiedad índice de densidad seca.

Como criterio general se ha podido observar que los valores tanto de ángulo de rozamiento interno como de cohesión presenta una clara tendencia al incremento, conforme se aumentan los valores de densidad seca.

La tendencia gradual que se observa de dicho aumento es claramente sintomática de su dependencia con respecto a los valores de referencia o índice de la densidad seca y a su consiguiente incremento.

Las correlaciones de tipo exponencial obtenidas se pueden observar a continuación:

Densidad seca (g/cm ³)	R
De 1.40 a 1.49	-0.96
De 1.50 a 1.59	-0.79
De 1.60 a 1.69	-0.93
De 1.70 a 1.79	-0.50
De 1.80 a 1.90	-0.69
Mayor de 1.90	-0.84

Tabla 1

Finalmente, la mayor adaptación lograda ha sido agrupando los datos según intervalos u horquillas de valores de densidades secas.

Densidad seca (g/cm ³)	R
De 1.40 a 1.65	-0.93
De 1.66 a 1.85	-0.83
De 1.86 a 2.10	-0.78

Tabla 2

Se presenta el ábaco de los valores experimentales donde se han definido tres zonas sombreadas en función de la compactación de la muestra, tomando como indicador la densidad seca (figura 4).

El porcentaje de parejas de valores, de cohesión y ángulo de rozamiento, que se sitúan fuera del área que le corresponde según el modelo planteado y para cada intervalo de densidad seca es el siguiente:

- De 1.40 a 1.65 g/cm³ error del 3.05%
- De 1.66 a 1.85 g/cm³ error del 8.06%
- De 1.86 a 2.10 g/cm³ error del 0.67%

Dichos porcentajes son lo suficientemente bajos para considerar el método o sistema de cálculo muy acertado y con las suficientes garantías.

Las conclusiones que se extraen de esta representación son las siguientes:

a.- La figura conseguida, según el modelo de regresión realizado, se adapta sensiblemente a una gráfica tronco-cónica, dentro del espacio estudiado, con vértice tendente a ángulos de rozamiento infinitos, para cohesiones tendentes a cero, definiendo los suelos exclusivamente granulares.

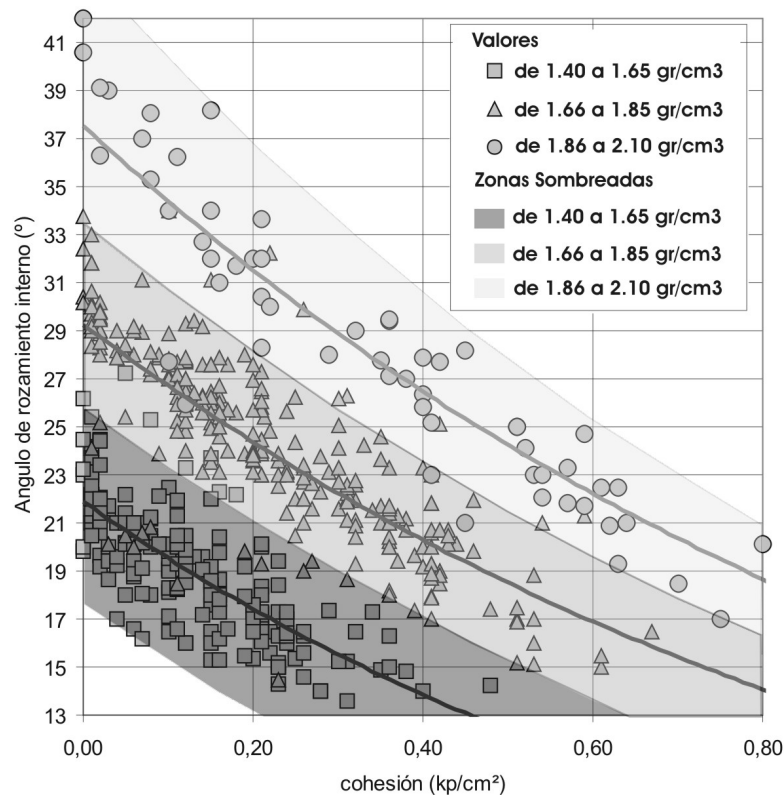


Figura 4. Ábaco de triple entrada donde se definen tres zonas en función del grado de densidad seca que presentan las muestras.

b.- Existe por consiguiente una clara tendencia de crecimiento del ángulo de rozamiento y la cohesión, cuando aumenta el valor de la densidad seca.

c.- Las curvas que agrupan parejas de cohesión y ángulo de rozamiento para valores idénticos de densidad seca, se disponen según modelos exponenciales, que definen la figura tronco-cónica referida anteriormente.

d.- En cualquier caso estos modelos exponenciales tienden a valores de ángulo de rozamiento iguales a cero cuando la cohesión crece hacia el infinito, definiendo los materiales exclusivamente cohesivos.

7 AMBITO DE APLICACIÓN

La universalidad de los ábacos propuestos viene definida por un doble carácter: litológico y geológico, por un lado, y geográfico por otro.

El origen de los materiales ensayados presenta una gran variabilidad litológica y geológica de procedencia. En la figura 5 se representa la ubicación geológica de los materiales ensayados, donde se puede observar la gran diversidad, en cuanto al origen, de estos suelos. Esta variabilidad demuestra una cierta independencia del modelo propuesto en cuanto a los ámbitos geológicos de procedencia.

Al objeto de cotejar las relaciones obtenidas se ha contado con datos procedentes de la bibliografía consultada de otras localizaciones geográficas observándose una aceptable

adecuación de las hipótesis planteadas. Los datos reflejados son procedentes de enugu-onitsha express road, Southeastern Nigeria (Okagbue and Ifedigbo, 1995), Alki area of Seattle, Washington (Debray and Savage, 2001) y Ben Karrich, Marruecos (Hernandez, 1996).

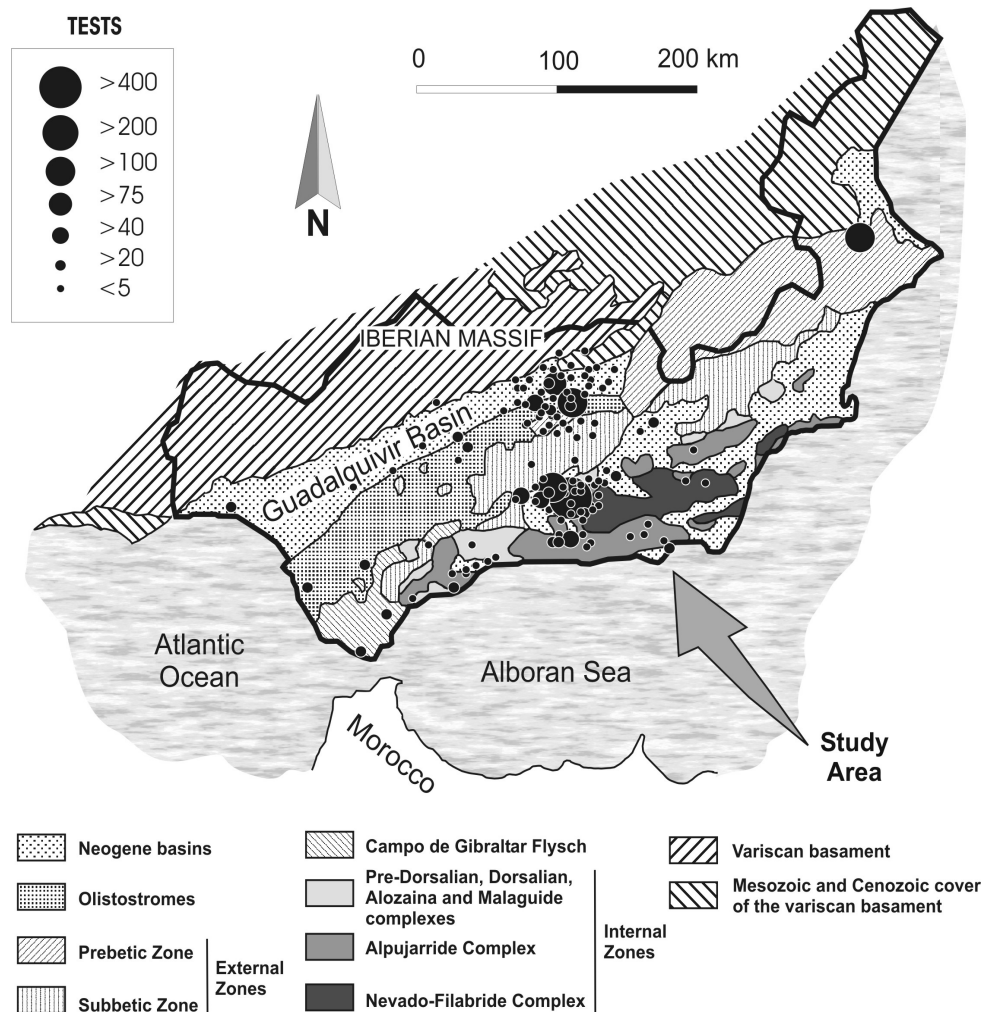


Figura 5. Distribución de las muestras ensayadas.

8 CONCLUSIONES

Las propiedades mecánicas de los suelos coherentes, ángulo de fricción (ϕ) y cohesión (c), son claramente dependientes de la densidad seca.

La principal conclusión del trabajo realizado es la formulación que puede plantearse para los suelos coherentes, o de transición, donde la ley de corte habrá de concordar con la expresión general del siguiente modo:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi \Rightarrow \tau = f c(\gamma_{\text{seca}}) + \sigma \operatorname{tg} f \phi(\gamma_{\text{seca}})$$

Se ha podido comprobar la correlación inversa entre la cohesión y el ángulo de rozamiento interno de los suelos de una amplia zona del Sur de España, cuando estos parámetros se miden en tensiones efectivas de pico.

Esta correlación se ha puesto de manifiesto cuando se ha utilizado un parámetro o indicador como es la densidad seca.

Con este estado del conocimiento se ha planteado un ábaco de triple entrada, donde se distribuyen las parejas de cohesión y ángulo de rozamiento en función de la compacidad de la muestra, o lo que es lo mismo, una determinada horquilla de valores de densidad seca.

A priori, las triadas de valores obtenidas (cohesión, ángulo de rozamiento interno y densidad seca) se han adaptado estadísticamente con un elevado grado de ajuste, independientemente de su entorno geológico, litológico o geográfico. Esta independencia plantea el estudio como una propuesta de carácter universal para los suelos coherentes.

Las limitaciones que se deben plantear al estudio realizado pasan por dos puntos clave:

1.- La necesidad de contrastar los resultados obtenidos con nuevos conjuntos de datos. Este mayor volumen de datos, deberá afinar aún mas las correlación obtenidas.

2.- Se considera la necesidad de complementar el estudio con otras propiedades índice que perfeccionen y armonicen la relación obtenida de la siguiente manera:

$$\tau = f_c (\gamma_{seca} + \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n) + \sigma \tan \phi (\gamma_{seca} + \eta_1 + \eta_2 + \dots + \eta_n)$$

donde η_1 , η_2 , y η_n sean los nuevos parámetros índice.

9 APLICACIONES

El ábaco de triple entrada planteado, debe ser una eficaz herramienta, en fase de conocimiento previo o anteproyecto, para la determinación de los parámetros resistentes de los suelos coherentes, a partir del conocimiento del parámetro de la densidad seca de los materiales implicados.

Con métodos directos, prácticamente de campo, será posible determinar la densidad seca de un talud o ladera. A partir de este dato se podrá inducir una estimación de los parámetros resistentes de los suelos y, por ende, determinar con un cierto grado de fiabilidad el factor de seguridad a la estabilidad del talud o ladera considerada.

Hemos de hacer hincapié en que el método planteado debe ser considerado como una aproximación a la realidad de los suelos, y nunca deberá ser entendido como una definición final de los parámetros geomecánicos, siendo necesario el imprescindible reconocimiento de campo y los preceptivos ensayos de laboratorio.

10 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

BOWLES, J.E. (1988).- Foundation Analysis and Design.- 4rd. Ed. - 1004 pp.- McGraw-Hill Book Co.

DAS B.M. Principles of Geotechnical Engineering. PWS-Kent. 1990. 665 pp.

DEBRAY S. AND SAVAGE W.Z. A preliminary finite-element analysis of a shallow landslide in the Alki area of Seattle, Washington. USGS. Open-File Report 01-0357 (2001).

DEWEY, J.F., HELMAN, M.L., TURCO, E., HUTTON, D.H.W., and KNOTT, S.D., 1989. Kinematics of the western Mediterranean. In Coward, M.P., Dietrich, D., and Park, R.G. (Eds), Conference on Alpine Tectonics. Geol. Soc. Spec. Publ. London, 45:265-283.

GALINDO-ZALDÍVAR, J., A. JABALOY, I. SERRANO, J. MORALES, F. GONZÁLEZ-LODEIRO and F. TORCAL. Recent and present-day stresses in the Granada Basin (Betic Cordilleras): example of a late Miocene-present-day extensional basin in a convergent plate boundary, 1999. *Tectonics*, vol.18, no. 4, 686-702.

HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C. (1988). Análisis Metodológico de la Cartografía Geotécnica Urbana de la Ciudad de Granada. Tesis Doctoral. Universidad de Granada.

HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C. (1996). Geologic and geotechnic informe y ensayos de información sobre el estado patológico existente en los edificios del hospital de Ben Karrich Tetuan, Morocco. Documento Inédito.

HERNÁNDEZ DEL POZO, J.C.; OCETE RUIZ, I. HERNÁNDEZ GARVAYO J.C. (2001). La confluencia de los ríos Genil y Darro en la ciudad de Granada. Mapa sintético de los depósitos aluviales de la zona de interacción de los dos cauces. II Congreso Andaluz de Carreteras. Ponencia nº 98

LIAO, S.S.C; WHITMAN, R.V. (1986).- Overburden Correction Factors for SPT in Sand - JGED - ASCE - Vol 112 No. 3, pp. 373-377.

MECSI J. Behaviour of the soil plasticity according to the new expanded cavity theory concept in soil. International Symposium. Anniversary of Pollack Mihály Engineering Faculty. May 31-June 1, 2002. Pécs, Hungary.

OBIEFUNA G.I., NUR A., BABA A.U. AND BASSEY N.E. Geological and Geotechnical Assessment of Selected Gully Sites, Yola, Northeast Nigeria. *Journal of Environmental Hydrology*. Vol. 7, paper 6 May 1999.

OKAGBUE C.O. AND IFEDIGBO O.T. Engineering Properties and Slope Stability of Road Cuttings Along the enugu-onitsha express road, Southeastern Nigeria. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. Paris-nº 52- Octobre 1995.

OKAGBUE, IFEDIGBO (1995) problemes de stabilité de pentes dans des deblais ruetiers along d'une route express dans le sud-ouest du Nigeria. *Boullletin IAEG*, nº 52.

ROMANA, M. El papel de las clasificaciones geomecánicas en el estudio de la estabilidad de taludes. En "Alonso, E.; Corominas, J., Chacón, J., Oteo, C. y Pérez, J., 1997, IV Simp. Nac. Taludes y Laderas Inestables, Granada", vol III, pp. 955-1011.

SCHMERTMANN, J.H. (1975) - Measurement of In-situ Shear Strength - Proc ASCE Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties - Raleigh- Vol. 2

SKEMPTON, A.W. (1986).- Standard Penetration Tests Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation- *Geotechnique*, Vol. 36, No.3 pp. 425-447

TERZAGHI, K. & PECK, R. P. *Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica*. Editorial "El Ateneo" S.A.. Ed. 3a Reimp. 1978. p. 722.

TERZAGHI, K.; PECK, R.B.; MESRI, G. (1996).- *Soil Mechanics in Engineering Practice*.- 3rd. Edition- John Wiley and Sons.

ZECK, H.P., MONIÉ, P., VILLA, I.M., and HANSEN, B.T., 1992. Very high rates of cooling and uplift in the Alpine belt of the Betic Cordilleras, southern Spain. *Geology*, 20:79-82.