

# Estudio de enrocados utilizando modelos reducidos

---

**FELIX HERNANDEZ**

Instructor asociado. Sección de geotecnia  
Departamento de ingeniería civil  
Universidad Nacional de Colombia

**FERNEY BETANCOURT CARDOZO**

**JAIME VIDALES CAMACHO**

Ingenieros civiles, U.N.

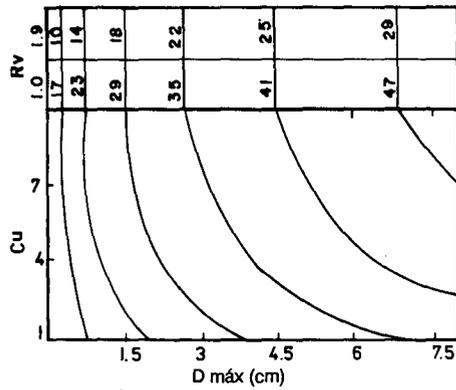
## INTRODUCCION

El comportamiento de la resistencia y compresibilidad de los enrocados como un medio granular, depende en gran parte de las propiedades de sus partículas o fragmentos, no sólo en las gravas y arenas que por su origen tienen los granos más resistentes, sino también en los enrocados de una misma fuente, debido al intemperismo y a defectos como los naturales y los producidos por la acción de explosivos, manejo, extracción, transporte y colocación de la roca en el sitio; razones como éstas hacen de los enrocados naturales un material de difícil análisis con un buen grado de confiabilidad.

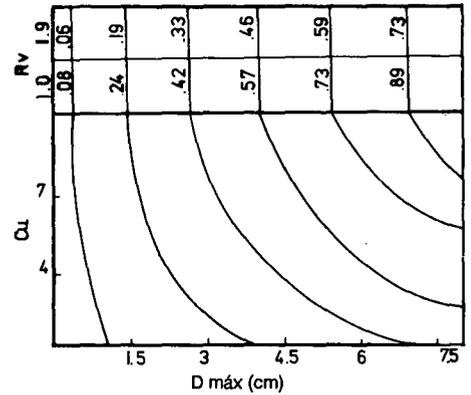
Basados en las anteriores consideraciones, se adelantó esta investigación como proyecto de grado, partiendo de modelos adecuados para un grupo de enrocados, donde fuera posible analizar una de las principales características de los enrocados naturales, su resistencia; las evidencias experimentales indican que esta característica es función de la forma, distribución granulométrica, tamaño máximo de los granos ensayados, resistencia individual de las partículas, ángulo de fricción interparticular, y relación de vacíos inicial de la muestra de ensayo, entre otros.

Los modelos de enrocados permiten estudiar la incidencia de cada uno de los factores influyentes de manera discriminada, con base en la teoría de la similitud <sup>(1)</sup>; el material de los enrocados reducidos consistió en una mezcla de yeso, arena, agua y un aditivo, plastificante retardador usado comúnmente en concretos.

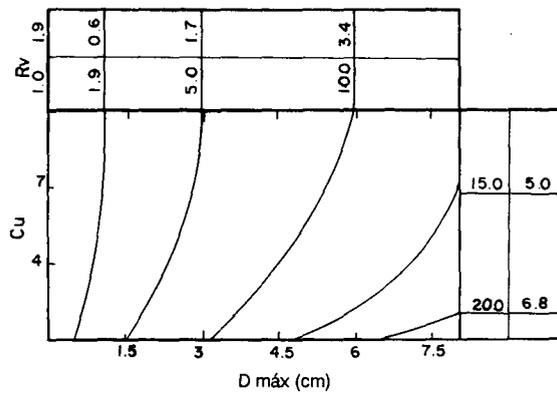
La investigación estuvo dirigida al análisis y cuantificación de la influencia de la forma, distribución granulométrica y tamaño máximo de los granos del enrocado de ensayo; los demás factores como la densidad relativa inicial, ángulo de fricción interparticular y resistencia a la compresión del material o el peso unitario de sus partículas, se pretendió mantenerlos constantes. Se usaron los parámetros hiperbólicos para el análisis del comportamiento esfuerzo - deformación para suelos granulares compactados, propuestos inicialmente por



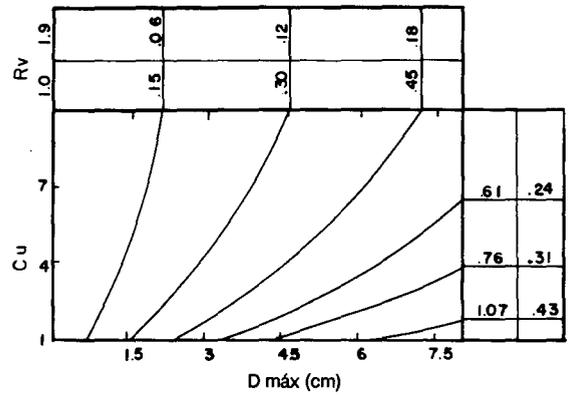
I.a. Parámetro  $K'$



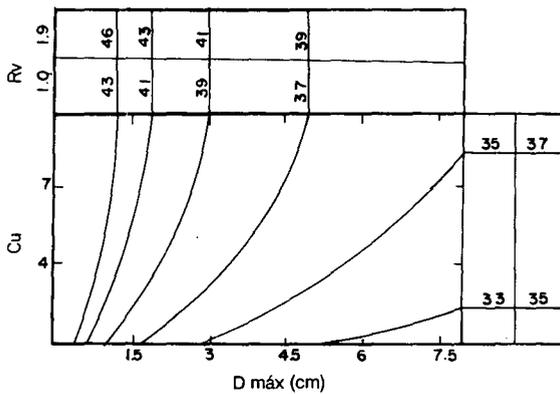
I.b. Parámetro  $n$



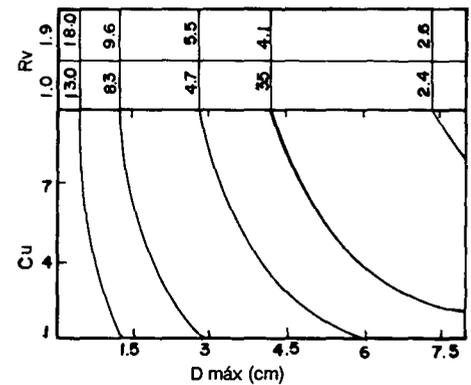
I.c. Parámetro  $K'_2$



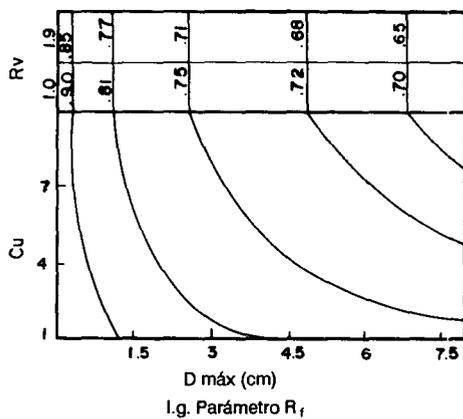
I.d. Parámetro  $m$



I.e. Parámetro  $\phi_0$



I.f. Parámetro  $\Delta \phi$



I.g. Parámetro  $R_f$

FIGURA 1. Curvas isoparamétricas de los parámetros hiperbólicos a partir de los modelos de enrocados en función del factor de forma (Rv), coeficiente de uniformidad (Cu) y el tamaño máximo de granos (D máx).

Kondner y Zelasko y complementados luego por Duncan <sup>(2)</sup>; estos parámetros que son representativos del comportamiento de los enrocados, facilitan la aplicación del análisis de similitud.

### CARACTERISTICAS DE LOS MODELOS

La elaboración de las partículas para los enrocados en las condiciones mencionadas fue limitada por dificultades prácticas y económicas, como la disponibilidad de equipos triaxiales adecuados y la fabricación misma de los enrocados. Las formas de partículas ensayadas fueron ideales, cúbicas y esféricas; las granulometrías, uniforme y medianamente gradadas; el tamaño máximo de los granos de 3/4 y 1 + 1/2 pulgadas; la densidad relativa inicial, del 80 %; la fricción interparticular, constante y correspondiente a la mezcla óptima de los materiales; el peso unitario de las partículas, aproximadamente constante. Los componentes de la mezcla son yeso (1.0), arena (0.4), agua (0.4) y aditivo (0.25 %) del yeso.

En la elaboración de partículas cúbicas se implementaron procedimientos y dispositivos, como los moldes metálicos en forma de panales, en donde se vertía el material un poco fluidificado por el aditivo; niveladores y cortadores para las partículas de menores tamaños, entre otros. En la elaboración de las partículas esféricas se usó exclusivamente el método manual, de fricción, para todos los tamaños, teniendo en cuenta las condiciones plásticas que ganaba la mezcla cuando iniciaba su fraguado, por el aditivo.

### APLICACION DEL ANALISIS DE SIMILITUD

La influencia de la forma en el comportamiento de los enrocados se cuantificó mediante el factor de forma RV, introducido por Marsal <sup>(3)</sup>. Las distribuciones granulométricas para las formas y equipos triaxiales disponibles fueron caracterizadas por los coeficientes de uniformidad Cu, que es una relación de diámetros de las partículas y elegido como el parámetro representativo por ser el más usual y general. La influencia del tamaño máximo de los granos se caracterizó por el Dmáx, máximo tamaño que permitía cada equipo, de modo que cumpliera una relación de diámetro de probeta a diámetro de partícula de seis, aproximadamente.

El comportamiento esfuerzo-deformación de los enrocados modelos fue dado por las pruebas triaxiales consolidadas drenadas en su estado seco, con igual velocidad de deformación en los equipos usados, y sus correspondientes parámetros hiperbólicos se aplicaron de acuerdo con sus definiciones, establecidas por Duncan <sup>(2)</sup>.

Debido a las exigencias de grandes esfuerzos y labores

dispendiosas, principalmente para la fabricación de los enrocados, sólo fue posible establecer una pequeña muestra experimental, respecto a la cobertura que requiere la investigación. Utilizando los conjuntos de datos por cada variable, se establecieron las tendencias del comportamiento de cada uno de los parámetros hiperbólicos para los enrocados, a partir de los cuales por aplicación de la teoría de la similitud se predijeron las ecuaciones que rigen la resistencia de los enrocados.

Las ecuaciones de predicción obtenidas con base en tres variables significativas e independientes, para cada uno de los parámetros hiperbólicos representativos del comportamiento de los enrocados naturales, a partir de enrocados modelos, tienen por expresión general:

$$P = C * Cu^{x*} Rv^{y*} (Do / Dmáx)^z$$

donde:

P = Cualquiera de los parámetros hiperbólicos descritos por Duncan <sup>(2)</sup> como son:

- K y n : coeficiente y exponente del módulo tangente inicial,

$$Ei/Pa = K (\sigma_3/Pa)^n,$$

$\sigma_3$  = presión de cámara

Pa = presión atmosférica.

- Kb y m : coeficiente y exponente del módulo Bulk,

$$B/Pa = Kb * (\sigma_3/Pa)^m$$

- $\phi_0$  y  $\Delta\phi$ : ángulo de fricción interna para la presión de una atmósfera y la reducción del ángulo de fricción interna para un ciclo logarítmico de 10 de la presión de cámara,

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \log_{10} (\sigma_3/Pa)$$

- Rf = relación de falla, del esfuerzo desviador en la falla y el esfuerzo desviador último,

$$Rf = (\sigma_1 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ últ.}$$

C = Constante propia de cada parámetro hiperbólico.

Cu = Coeficiente de uniformidad, definido por el sistema de clasificación unificada de suelos USC,

Cu = D60 / D10 siendo:

D60: diámetro del tamiz por el cual pasa el 60 %

D10: diámetro del tamiz por el cual pasa el 10%

Rv = Factor de forma, una relación del volumen de la

TABLA 1

**Coefficientes y exponentes de las ecuaciones generales de los parámetros hiperbólicos de predicción en un modelo reducido de yeso - arena.**

$$\text{Ecuación general} \quad P = C \cdot C_u^x \cdot R_v^y \cdot \left( \frac{5}{D \cdot \text{máx.}} \right)^z$$

P	C	x	y	z
K	31.723	0.131	-0.761	-0.300
n	0.279	0.381	-0.311	-0.827
K'b	15.267	-0.260	-1.675	-1.006
m	0.918	-0.450	-1.403	-0.898
$\phi'$	32.975	0.050	0.080	0.109
$\Delta \phi'$	5.833	-0.274	-0.238	0.703
Rf	0.804	-0.051	-0.086	0.079

partícula al volumen de una esfera con el diámetro promedio de la partícula.

$D_o$  = Diámetro de una partícula arbitraria,  $D_o = 5$  cm.

$D_{\text{máx}}$  = Diámetro máximo de los granos para una determinada probeta de ensayo.

X, Y, Z, = Exponentes.

Los resultados en la predicción de ecuaciones muestran explícitamente la contribución de las variables analizadas, las cuales se presentan analíticamente y en figuras, como en la Tabla 1 y Figura 1. Es necesario advertir que estas expresiones no pueden ser generales para el comportamiento de los enrocados, por no cubrirse la totalidad de las variables significativas y porque además, las analizadas tienen un rango limitado por las razones prácticas ya expuestas; sin embargo, abren varias posibilidades y orientan el trabajo científico en aspectos como confirmar factibilidades en el uso de la teoría de la similitud en grandes problemas de la geotecnia y la organización adecuada de la información y de una estimación realista del trabajo requerido en investigaciones futuras en este campo.

Con los parámetros hiperbólicos predichos por este sistema, se pueden deducir las respectivas relaciones esfuerzo-deformación del enrocado investigado para los requerimientos prácticos deseados, como también obtener la respectiva envolvente de resistencia. Para el caso particular de valores del mismo modelo se presenta un desarrollo completo con las siguientes especificaciones:

Modelo esférico ( $R_v = 1.0$ ), granulometría uniforme ( $C_u = 1.5$ ), diámetro máximo de granos ensayados, de

1.5 pulgadas ( $D_{\text{máx}} = 1.5$  pulgadas) y presiones de confinamiento ( $\sigma_3$ ) de 0.257, 0.478, 0.733  $\text{Kg/cm}^2$ .

Según el ensayo de ruptura de partículas, se obtuvo una fuerza de resistencia ( $P_5$ ) de 131.47 Kg.

A partir del esfuerzo de ruptura estándar se determinan los parámetros hiperbólicos (estandarizados así por conveniencia) y con éstos, los elementos para la curva hiperbólica de esfuerzo-deformación:

Esfuerzo de ruptura estándar,  $\sigma_{co} = P_5/25 = 5.26$   $\text{Kg/cm}^2$

Parámetros  $K'$  y  $n$  según valores de la Tabla 1:

$$K' = 30.85 \quad n = 0.260$$

Los elementos de las curvas hiperbólicas esfuerzo-deformación, se consignan en la Tabla 2; a continuación se detallan sus ecuaciones:

Módulo tangente inicial,

$$E_i = K' \cdot \sigma_{co} \cdot \left( \frac{\sigma_3}{\sigma_{co}} \right)^n$$

Parámetro hiperbólico relación de falla,  $R_f = 0.805$  según su ecuación, Tabla 1:

Ángulos de fricción interna,

$$\phi' = \phi_0 - \Delta \phi \cdot \log(\sigma_3 / \text{Pa})$$

Parámetros hiperbólicos para el ángulo de fricción:

$$\phi_0 = 34.66 \text{ y } \Delta \phi = 6.31$$

Esfuerzo desviador en la falla, según expresión de Mohr-Coulomb,

TABLA 2

Valores de un ejemplo de determinación de curvas esfuerzo - deformación y envolventes de resistencia por ecuaciones de predicción.

Presión cámara $\sigma_3$ (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo tangente inicial $E_i$	Coefficiente de $E_i$ $a = 1/E_i$	Angulo de fricción $\phi'_f$	Esfuerzo desviador $(\sigma_1 - \sigma_3)$	Esfuerzo desviador último $(\sigma_1 - \sigma_3)$ último	Coefficiente de $\Delta \sigma$ último $b = 1/\Delta \sigma$ último
0.257	74.02	0.01351	38.47	0.846	1.052	0.95057
0.478	86.98	0.01150	36.77	1.426	1.772	0.56433
0.733	97.21	0.01020	35.60	2.042	2.538	0.39401

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = 2 \sigma_3 \text{ Sen } \phi'_f / (1 - \text{Sen } \phi'_f)$$

Parámetro hiperbólico, esfuerzo desviador último:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{últ}} = (\sigma_1 - \sigma_3)_f / R_f$$

Con los valores de módulo tangente inicial se determinan los coeficientes "a" y con los valores de los esfuerzos desviadores últimos, se determinan los coeficientes "b":

$$a = 1/E_i \quad b = 1 / (\sigma_1 - \sigma_3)_{\text{últ}}$$

Con los coeficientes "a" y "b" obtenidos, se determina la hipérbola que describe su curva esfuerzo-deformación, para la presión de confinamiento especificada:

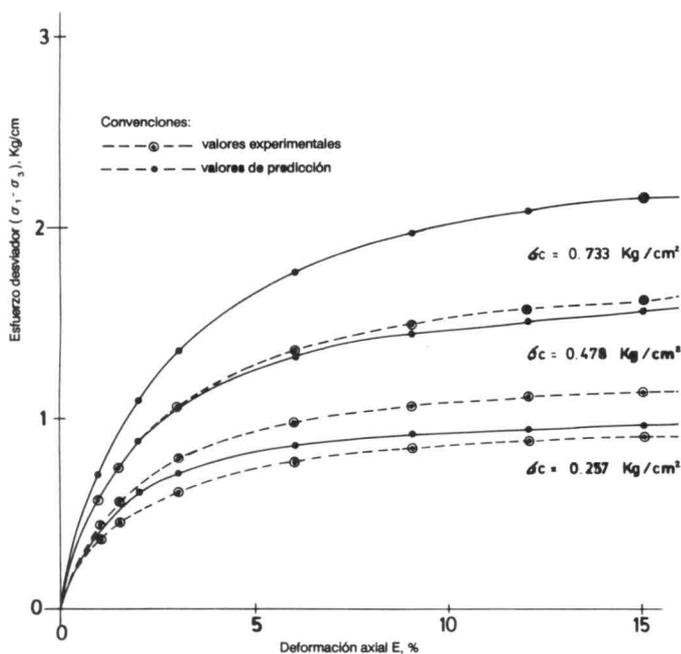


FIGURA 2. Curvas hiperbólicas para relaciones esfuerzo-deformación de material del modelo esférico de gradación uniforme y tamaño máximo de los granos de 1.5 pulgadas.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_i = e_i / (a + b e_i) \quad e_i = \text{deformación axial}$$

En la Figura 2 se ilustran las curvas esfuerzo-deformación del modelo esférico en consideración, con los valores experimentales y los valores obtenidos por medio de ecuaciones de predicción. Igualmente la Figura 3 ilustra las envolventes de resistencia calculadas por el sencillo procedimiento de trayectoria de esfuerzos, con los valores experimentales y con los valores de predicción.

Para comparar resultados como una forma de validez con resultados experimentales de enrocados naturales usados en presas térreas, se tomó la Filita de Chivor como una referencia para el modelo en yeso-arena-agua-aditivo retardador. Era obvio encontrar gran discrepancia en los resultados, pues los enrocados naturales en este caso, obedecen a condiciones con valores fuera del rango analizado, además de las razones expuestas sobre las limitaciones de la investigación.

## ALGUNAS CONCLUSIONES

Es factible la idealización de los enrocados naturales al punto de lograr modelos con mayor representatividad, como en el caso de los modelos en yeso, que gozan de cierta versatilidad, demostrados en estudios anteriores para presas. Se logró establecer que los modelos en yeso se pueden perfeccionar al punto de darles mayor peso unitario agregándoles arena, lo que trae una fricción semejante a los enrocados naturales; también podemos lograr alguna disminución de tiempo de manejabilidad para la conformación de las partículas, mediante la mezcla de aditivos de concretos. Las desventajas que traen estos modelos de yeso pueden condicionar su uso, como las de su tratamiento en seco y la dificultad de lograr compactaciones altas.

Se comprueba una vez más la realidad de la formulación hiperbólica para las relaciones esfuerzo-deformación en suelos granulares compactados, propuestos

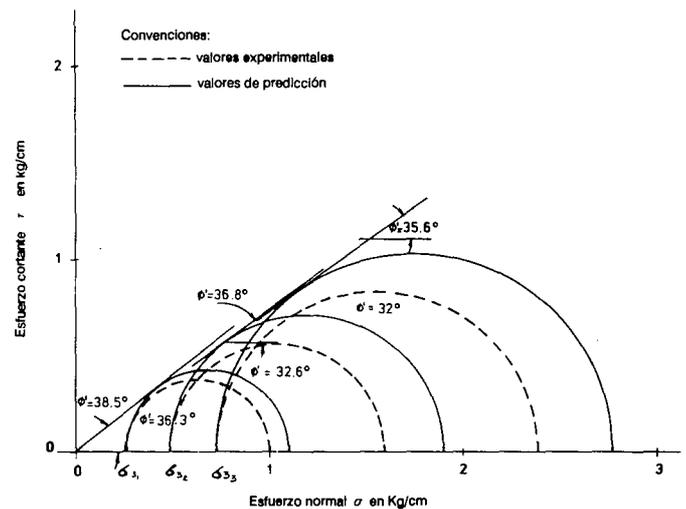
por Kondner y Zelasko que posteriormente adaptó Duncan <sup>(2)</sup>. Los parámetros son muy sensibles para que sean determinados por los sencillos procedimientos propuestos; requieren mayor amplitud y profundidad en sus aplicaciones para lograr mayor grado de confiabilidad; los parámetros así concebidos representan una gran herramienta en la caracterización de los enrocados naturales para idealizar modelos y por su facilidad en la aplicación del análisis de similitud.

Las predicciones expuestas representan un pequeño esfuerzo para lograr brevedad y economía en las dispendiosas labores que conllevan los grandes proyectos geotécnicos. Aunque las expresiones logradas no se pueden generalizar para el comportamiento de enrocados naturales, por motivos tales como pequeña muestra experimental, formas de partículas muy ideales y geométricas, gradaciones similares y pocos equipos adecuados por el tamaño, pero son, sin embargo, un gran avance que aporta valiosos recursos para el logro de resultados con buen grado de confiabilidad, en futuras investigaciones.

Para análisis similares que incluyan todas las variables significativas hasta ahora conocidas en el comportamiento de los enrocados, sus resultados serán útiles en estudios especiales que requieren el uso del computador, para las grandes obras de la geotecnia a nivel de prefactibilidad. Está demostrado que además permiten

deducir las relaciones esfuerzo-deformación y su correspondiente envolvente de resistencia, para condiciones determinadas de ensayo, con la ayuda de pruebas sencillas como la rotura de partículas.

La importancia y la cobertura de una investigación en este campo de la geotecnia, ameritan la continuidad y apoyo de los sectores científicos y gubernamentales pertinentes.



**FIGURA 3. Envolventes de resistencia Mohr-Coloumb para el material del modelo esférico de gradación uniforme y tamaño máximo de granos de 1.5 pulgadas.**

## BIBLIOGRAFIA

1. Murphy, Glenn. **Similitude in engineering**. The Ronald Press Company, New York, 1950.
2. Duncan J.M., Byrne Peter, Wongkai, Mabry Phillip. **"Strength, stress - strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soils masses"**. Report No. UCB/GT/80-01. Berkeley, California. August, 1980.
3. Marsal, Raúl J. **Contribuciones a la mecánica de medios granulares**. Selección de trabajos de Raúl J. Marsal; prólogo Daniel Reséndiz N., traducción de unos escritos de Raúl Esquivel Díaz. México, 1963.