

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ENROCADOS POR EL
MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS**

MARÍA FERNANDA LIMAS SUÁREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ENROCADOS POR EL
MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS**

MARÍA FERNANDA LIMAS SUÁREZ

**Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniera Civil**

Director:

**Wilfredo del Toro Rodríguez
Ingeniero Civil M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

AGRADECIMIENTOS

El más sincero agradecimiento al departamento de Ingeniería Civil y Urbanismo del INSA de Lyon por permitirme trabajar en este proyecto durante mi intercambio académico en Francia. Igualmente a la profesora Claire Silvani y al doctorante François Nader por todos los conocimientos brindados sobre el tema, la guía en la realización del trabajo y la ayuda en el uso del software LMGC90.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	12
1. CARACTERISTICAS DE LOS ENROCADOS.....	13
1.1. Compresibilidad.....	13
1.2. Resistencia al corte	14
2. RUPTURA DE GRANOS.....	15
2.1. Modos de ruptura	15
2.2. Tasa de ruptura	16
2.3. Factores influyentes en la ruptura de granos	17
3. METODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM).....	23
3.1. Software LMGC90.....	24
3.2. Leyes de Contacto	25
4. MODELACIÓN	26
4.1. Ensayo de compresión diametral	26
4.2. Ensayo de compresión edométrica	32
4.3. Análisis de resultados.....	43
5. CONCLUSIONES.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	47

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Curva de compresibilidad de un ensayo edométrico.</i>	14
<i>Figura 2. Modos de ruptura frágil [24]</i>	15
<i>Figura 3. Tipos de ruptura en un ensamble granular [24].</i>	16
<i>Figura 4. Definición de tasa de ruptura [5].</i>	17
<i>Figura 5. Influencia de la angularidad en la tasa de ruptura de granos [12]</i>	18
<i>Figura 6. Resultados de resistencia a la ruptura de agregados de roca [24].</i>	21
<i>Figura 7. Efecto de la humedad en ensayos triaxiales sobre un enrocado de pizarra. (a) Material caturado. (b) Humedad relativa de 36% [2].</i>	22
<i>Figura 8. Etapas del análisis de contacto múltiple en un Método de Elementos Discretos (LMGC90)</i>	24
<i>Figura 9. Leyes de contacto contacto entre dos elementos</i>	25
<i>Figura 10. Diagrama de ensayo de compresión diametral</i>	26
<i>Figura 11. Modelo discreto de ensayo de compresión diametral</i>	27
<i>Figura 12. Curva Fuerza vs. Deformación obtenida del modelo del ensayo de compresión diametral</i>	28
<i>Figura 13. Diagrama de fuerzas internas en el momento de ruptura de una roca de diámetro 10 cm en un modelo discreto.</i>	28
<i>Figura 14. Variación de la resistencia a la tracción en función de la cohesión para una roca sometida a un ensayo de compresión diametral.</i>	29
<i>Figura 15. Modelos de ensayo de compresión diametral para muestras de diámetro 5cm, 10cm y 20cm respectivamente.</i>	30
<i>Figura 16. Resistencia a la tracción vs. Cohesión para tres rocas de diferente diámetro sometidas a un ensayo de compresión diametral.</i>	31
<i>Figura 17. Diagrama de ensayo de compresión edométrica</i>	32

<i>Figura 18. Distribución de fuerzas normales de contacto en un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 10cm.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 19. Tipos de fuerzas de contacto en el modelo discreto.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 20. Modelo discreto de un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 10cm.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 21 . Curva Fuerza vs. Deformación obtenida del modelo del ensayo de compresión diametral (Modelo 1).....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 22. Comparación de curvas Fuerza vs. Deformación para tres materiales de cohesión diferente.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 23 Curva de compresibilidad de la muestra obtenida del ensayo de compresión diametral (Modelo1).....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 24. Distribución de fuerzas normales de contacto en un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 20cm.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 25. Modelo discreto de un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 20cm.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 26. Comparación de curvas Fuerza vs. Deformación obtenidas de los modelos 1 y 2.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 27. Curva de compresibilidad de la muestra obtenida del ensayo de compresión diametral (Modelo 2).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 28 . Distribución de fuerzas normales de contacto en un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 10cm y 20cm.</i>	<i>41</i>
<i>Figura 29. Modelos con diferente distribución aleatoria de partículas</i>	<i>41</i>
<i>Figura 30. Modelo discreto de un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetros 10cm y 20cm distribuidas aleatoriamente.</i>	<i>42</i>
<i>Figura 31. Curva de compresibilidad de la muestra obtenida del ensayo de compresión diametral (Modelo 2, Muestra 1).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 32. Comparación de curvas de compresibilidad para las muestras de los tres modelos.</i>	<i>44</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Resistencia a la tracción obtenida de modelos de ensayos de compresión diametral para muestras de roca de tres diámetros diferentes.</i>	<i>31</i>
---	-----------

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ENROCADOS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS*

AUTOR: MARÍA FERNANDA LIMAS SUÁREZ**

PALABRAS CLAVE: PRESA, ENROCADO, METODO DE ELEMENTOS DISCRETOS

DESCRIPCIÓN:

Las presas en enrocado son grandes estructuras conformadas por bloques de roca, ampliamente utilizadas por su efectividad, economía y fácil construcción. Debido al gran tamaño de las rocas, los enrocados constituyen un tipo especial de material granular, presentando un comportamiento diferente a los materiales granulares finos más estudiados.

En este trabajo se presenta una revisión general del comportamiento mecánico de los enrocados, evaluando las características principales de estos materiales. Además, se analiza la influencia de algunas propiedades físicas del material en la repartición de esfuerzos y la resistencia final de la estructura, recurriendo a teorías y estudios de diferentes autores.

Así mismo, se utiliza un software de elementos discretos para analizar el comportamiento de los enrocados sometidos a esfuerzos de compresión. El Método de Elementos Discretos es ideal para el estudio de este tipo de materiales, ya que permite la modelación numérica de medios discontinuos, simulando el medio como un ensamble de elementos independientes relacionados entre sí por leyes de contacto. De esta forma, se realizaron modelos en dos dimensiones de ensayos de compresión diametral y compresión edométrica sobre muestras de enrocados. Con los modelos es posible observar el fenómeno de ruptura de rocas y evaluar la influencia de varias propiedades tales como la forma, el tamaño y la granulometría del material en la resistencia de los enrocados.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez, Ingeniero Civil M.Sc.

ABSTRACT

TITLE: ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE ENROCADOS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS DISCRETOS*

AUTHOR: MARÍA FERNANDA LIMAS SUÁREZ**

KEY WORDS: DAM, ROCKFILL, DISCRETE ELEMENT METHOD

DESCRIPTION:

The rockfill dams are widely used structures thanks to its effectiveness, low cost and ease of build. Due to the large size of rocks, the rockfill represents a special kind of granular material, so it has a different behavior from more studied fine granular material.

This paper presents a general review of the mechanical behavior of rockfills, by assessing the main characteristics of these materials. Moreover, it is analyzed the influence of several physical properties of materials on the stress distribution and the final strength of the structure, appealing to theories and studies from different authors.

Furthermore, a discrete element software is used to analyze the behavior of rockfills under compressive stress. The Discrete Element Method is ideal for the study of this type of material, since it enables the numerical modelling of discontinua, by simulating a mass as an assembly of independent particles related to each other by contact laws. In this way, two dimensional models of diametrical and oedometric compression tests on rockfill samples were performed. On the models it is possible to observe the phenomenon of rocks rupture and to assess the influence of several properties such as shape, size, and granulometry of the material on the rockfill resistance.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez, Civil Engineer M.Sc.

INTRODUCCION

Los enrocados son estructuras ampliamente utilizadas como presas en obras hidráulicas, ya que son estructuras económicas y de fácil construcción. Uno de los principales problemas que presentan estas estructuras son los grandes asentamientos luego de ser construidas, lo que ocurre debido a la naturaleza del material utilizado. Un enrocado es un grupo de bloques en roca de gran tamaño soportados unos sobre otros, que si bien son considerados como materiales granulares, tienen muchas diferencias respecto a los materiales granulares clásicamente estudiados como las arenas [3], por lo que es importante estudiar su comportamiento y características particulares..

Cuando una capa de enrocado es sometido a grandes esfuerzos, las partículas sufren ruptura, cambiando las características del material, su distribución y por ende su comportamiento mecánico. El fenómeno de ruptura de los bloques va a depender tanto de sus condiciones de confinamiento como de sus propiedades y resistencia individual. En los enrocados, el hecho de tener bloques de gran tamaño puede amplificar la probabilidad de ruptura de estos, lo que produce asentamientos mayores en el material [3].

Mientras que el comportamiento de materiales granulares con granulometría fina como las arenas es muy estudiado, el de enrocados no lo es tanto, y los métodos y técnicas existentes hasta ahora en lo que respecta a presas en enrocados son empíricas y no provienen de estudios teóricos sobre su comportamiento mecánico. Esto es debido en parte a la dificultad de llevar a cabo los ensayos utilizados en materiales finos (como ensayo triaxial y de consolidación) a una escala mayor [22]. Por ende, es necesario recurrir a la modelización para comprender mejor el comportamiento de las presas en enrocado y optimizar su diseño.

El Método de Elementos Discretos (DEM) ofrece grandes ventajas para la modelización de este tipo de estructuras, ya que tiene en cuenta la discontinuidad en el medio y permite evaluar el contacto entre las diferentes partículas que lo componen. Aunque aún las limitaciones computacionales impiden hacer modelos muy detallados de este tipo de materiales, haciendo algunas simplificaciones se pueden obtener resultados aún más acertados que con métodos de modelización de medio continuo.

1. CARACTERISTICAS DE LOS ENROCADOS

Los enrocados constituyen un caso particular de materiales granulares, ya que presentan granos de tamaño considerable en relación al tamaño de la estructuras que conforman. Esta particularidad va a influir en el fenómeno de ruptura de granos, lo que confiere ciertas particularidades a su comportamiento mecánico.

El fenómeno de ruptura de granos se vuelve significativo a medida que el tamaño de las partículas aumenta [5], ya que los bloques grandes presentan más fallas y discontinuidades que granos pequeños. En cuanto al fenómeno de compactación, los enrocados tienen un comportamiento similar al de las arenas sueltas, una arena suelta sometida a un esfuerzo normal va a compactarse gracias al reordenamiento de las partículas, este es el mismo fenómeno que se produce en los enrocados, pero en los enrocados ocurre además la ruptura de granos. Bajo esfuerzos pequeños, los enrocados presentan ángulos de fricción más altos que las arenas, pero mientras los esfuerzos aumentan y las rupturas se vuelven más importantes, el afinamiento de la granulometría que resulta de esto permite que el ángulo de fricción disminuya acercándose al de las arenas [3]. Esto hace que el comportamiento del material cambie significativamente a medida que pasa el tiempo.

1.1. Compresibilidad

La característica que más diferencia a los enrocados de los materiales granulares más finos es su alta compresibilidad antes grandes esfuerzos, debido a la gran cantidad de vacíos existentes entre los bloques. El índice de vacíos (Eq. 1) es una relación volumétrica utilizada para definir el grado de compactación de un material.

$$e = \frac{V_{vacios}}{V_{solidos}} \quad (1)$$

Dada la dependencia de este parámetro al volumen del material, este puede ser definido en función de la granulometría, es por ende útil conocer la evolución de la granulometría a medida que ocurre la ruptura de los granos en un material granular.

En cuanto menor sea el índice de vacíos de un material, mayor grado de confinamiento tendrá cada partícula, lo que hace que el material sea más difícil de compactar y como consecuencia aumenten los esfuerzos. La relación entre índice de vacíos y esfuerzo se define como índice de compresión C_c y es este factor

quien va a definir la susceptibilidad del material a ser compactado. Para obtenerlo, se debe trazar una curva de compresibilidad del material (Figura 1), obtenida generalmente de un ensayo de compresión edométrica o de consolidación.

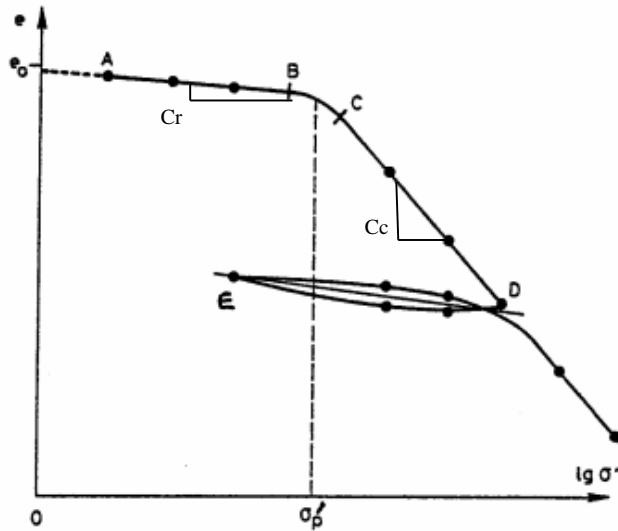


Figura 1. Curva de compresibilidad de un ensayo edométrico.

1.2. Resistencia al corte

Cuando un material granular se somete a esfuerzos de compresión, aparecen fuerzas de contacto entre los granos que lo componen. Los esfuerzos normales y tangenciales que se producen entre ellos, están relacionados entre sí por la ecuación de Mohr Coulomb (Eq. 2), que establece esta relación en función de la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ) del material.

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \quad (2)$$

La resistencia al corte de un suelo depende no solamente del material, sino también del camino de esfuerzos al cual el suelo este sometido. Por ejemplo, el ángulo de fricción no tiene el mismo valor si se compara un ensayo de deformación plana con un ensayo triaxial, o si se tienen en cuenta el efecto de rotación de las direcciones de los esfuerzos principales [22].

2. RUPTURA DE GRANOS

La ruptura de granos se produce por grandes esfuerzos sobre el material. En la mayoría de los casos los granos presentan discontinuidades naturales o fallas existentes, por donde se va a propagar la fisura una vez sean cargados.

2.1. Modos de ruptura

El modo de ruptura depende del camino que tomen los esfuerzos en el ensamblado granular y de cómo las fuerzas de contacto actúan sobre cada grano. En la mecánica de ruptura frágil, se consideran tres modos diferentes de ruptura (Figura 2):

- Modo I: Ruptura por esfuerzo de tracción normal a la fisura.
- Modo II: Ruptura por esfuerzo cortante paralelo al plano de la fisura y perpendicular al frente de la fisura
- Modo III: Ruptura por esfuerzo cortante paralelo al plano de la fisura y al frente de la fisura.

La ruptura por esfuerzo normal a la fisura (modo I) es el modo que presenta menos resistencia y requiere la menor cantidad de energía, por lo tanto es este modo de ruptura el más presentado en materiales de enrocados. El modo II, por el contrario, presenta la mayor resistencia, por lo cual es raro que se presente [13].

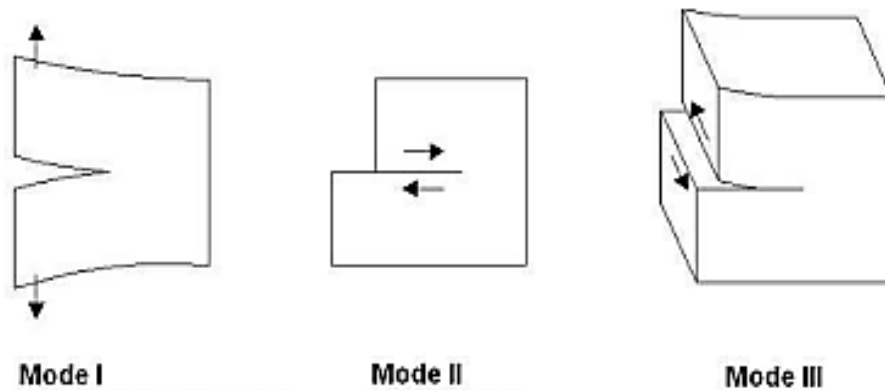


Figura 2. Modos de ruptura frágil [24]

Igualmente, según Guyon et Troadec [8], el modo de ruptura de las partículas en un ensamble granular puede ser separado cualitativamente en tres tipos (Figura 3):

- **Fractura:** ruptura de granos en granos más pequeños (de tamaño entre 25% y 50% de los granos de origen). Es igualmente el tipo de ruptura que requiere una mayor cantidad de energía.
- **Atrición:** de la superficie del grano principal se desprenden fragmentos de pequeño tamaño.
- **Abrasión:** generación de finos debido al frotamiento entre granos.

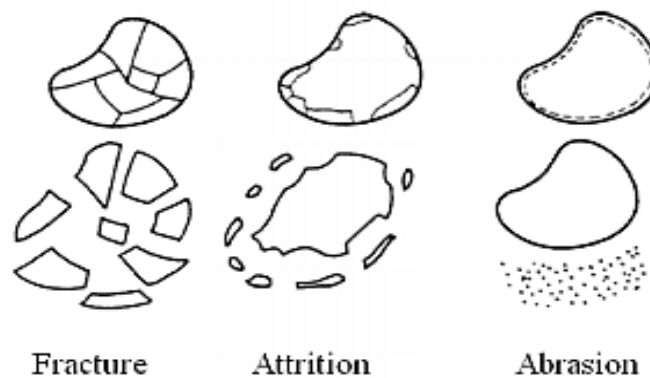


Figura 3. Tipos de ruptura en un ensamble granular [24].

2.2. Tasa de ruptura

Con el fin de cuantificar la ruptura, es necesario establecer un parámetro que sirva de comparación entre diversos niveles de ruptura, con respecto a una granulometría de referencia. Esta referencia puede ser la granulometría inicial, la granulometría última supuesta o simplemente un tamaño límite dado.

Marsal [17], [18] definió la tasa de ruptura de los granos con el parámetro B. El utilizó la diferencia de material retenido sobre cada tamiz antes y después del ensayo, definida como ΔW_k . La tasa de ruptura B está definida como la suma de los valores positivos ΔW_k .

Por otro lado, Hardin [9] y posteriormente Einav [5], [6] definieron la tasa de ruptura B_r , como la relación entre el área bajo las curvas granulométricas antes y

después del ensayo (Bt) y el potencial de ruptura (Bp) considerado como la ruptura hasta un tamaño de 0,074 mm. $B_r = B_t / B_p$ (Figura 4).

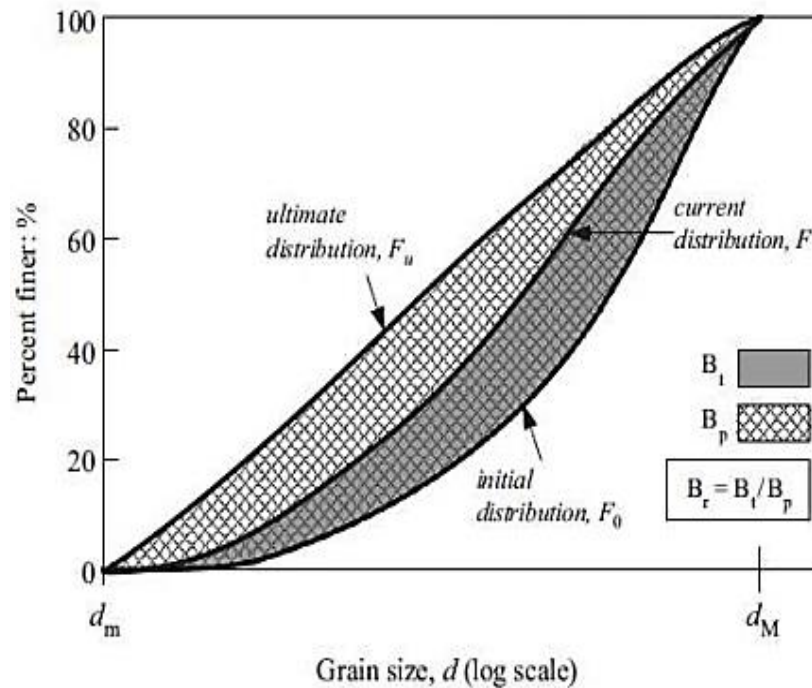


Figura 4. Definición de tasa de ruptura [5].

2.3. Factores influyentes en la ruptura de granos

Existen varios factores que afectan la ruptura de granos. De estudios y observaciones previas, se conoce que se presenta una mayor cantidad de ruptura de granos en materiales de granulometría uniforme, alto índice de vacíos, sometidos a grandes esfuerzos, con una baja resistencia, altamente saturados y de gran angularidad [14].

2.3.1. Origen y extracción del material

En las presas en enrocado, el material es usualmente extraído de las proximidades de la obra, por lo que el diseño se debe ajustar a la naturaleza del material, lo cual dependerá de la geología de la región. Debido a que no siempre se cuenta con material de la mejor calidad, es importante evaluar sus propiedades y así conocer su resistencia.

La mineralogía del material es definida por su origen geológico. La composición mineralógica es el principal factor determinante en la resistencia individual de cada grano, y puede incluso influir en la presencia de discontinuidades. Igualmente, el método de extracción cambia las propiedades mecánicas del material, produciendo fisuras y afectando la condición de la superficie de los granos, lo que modifica el ángulo de fricción entre las partículas.

2.3.2. Forma del grano

El número de partículas en contacto con un grano dado se denomina número de coordinación. Entre más grande sea este número, la partícula estará más confinada y las fuerzas de contacto serán más débiles. Los granos angulares tienen un número de coordinación más pequeño respecto a los granos redondeados y por ende son más vulnerables a la ruptura. En la figura 5 se observa el aumento de la ruptura de granos con la angularidad para una grava granítica después de un ensayo triaxial [10].

Esto se explica también por la incidencia de la dirección de las fuerzas interparticulares. En un medio compuesto de granos esféricos, estas fuerzas se dirigen hacia los centros de masa, el cual es el mismo centro de la esfera, donde se contrarrestan las fuerzas unas a otras. Por el contrario, en un medio compuesto de granos angulares o alargados, estas fuerzas no se dirigen hacia los centros de masa, lo que aumenta los esfuerzos cortantes y causa la fractura [1].

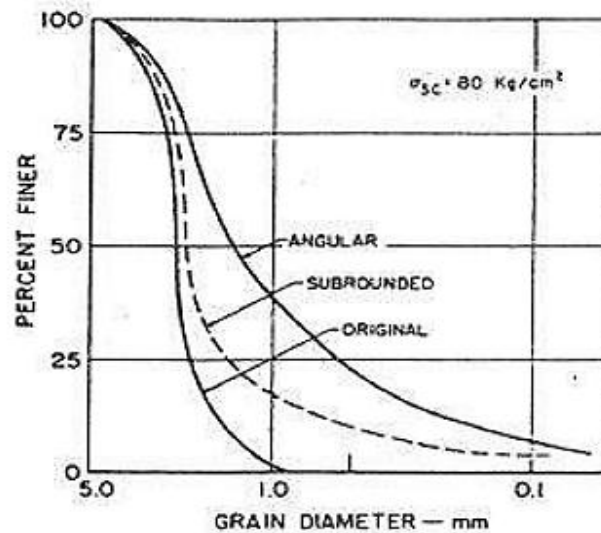


Figura 5. Influencia de la angularidad en la tasa de ruptura de granos [12]

2.3.3. Granulometría

Un material resistente a la ruptura se caracteriza por su capacidad de multiplicar los puntos de contacto entre sus elementos y de esta forma disminuir la intensidad de fuerzas interparticulares [1]. Los materiales granulares de granulometría bien gradada van a presentar granos bien confinados por lo que su ruptura será más difícil de alcanzar.

Un parámetro para definir la gradación de un material granular es el coeficiente de uniformidad (Cu). Para calcularlo se utiliza la siguiente relación $Cu=d_{60}/d_{10}$, con valores d_{60} y d_{10} obtenidos de la granulometría. En cuanto menor sea este factor, más uniforme es el material.

Igualmente, la experiencia muestra que en ensayos edométricos la pendiente de la curva de compresibilidad crece bruscamente en el caso de granos de mismo tamaño, porque las rupturas ocurren simultáneamente. En cambio, para granos de tamaño y formas diferentes, el fenómeno es más progresivo, porque la repartición de fuerzas de contacto es menos homogénea [1]. Por tanto, un coeficiente de uniformidad bajo se traduce en una ruptura más importante.

2.3.4. Tamaño de granos y efecto de escala

El porcentaje de ruptura de un enrocado aumenta con el tamaño de las partículas. Esto lo explica Marsal [18] como un efecto de escala: entre mayor sea el tamaño de las partículas mayor será su probabilidad de tener fisuras, y por ende mayor será la probabilidad de ruptura.

El trabajo experimental de Marsal [18] ha mostrado que la fuerza de ruptura de un grano individual f es proporcional a la potencia de su diámetro d . La expresión propuesta se muestra en siguiente ecuación, donde η y λ son parámetros propios del material.

$$f = \eta d^\lambda \quad (3)$$

Según Jaeger [10], se puede describir la relación entre la resistencia a la tracción σ_t y la fuerza de compresión F como:

$$\sigma_t = k \frac{f}{d^2} \quad (4)$$

El parámetro k depende de la geometría de la muestra y el tipo de ensayo. Jaeger [10] estimó el valor de k como 1 para ensayos sobre partículas esféricas de rocas en compresión (ensayo brasilero).

Utilizando las ecuaciones (3) y (4), Ovalle [24] propone una ley exponencial que expresa el efecto de escala en la resistencia a la ruptura de una partícula:

$$\sigma_t \propto d^b \quad (5)$$

Donde $b = \lambda - 2$ es un parámetro empírico y $\lambda = 2$ indica que no se presenta ningún efecto de escala.

El efecto de escala sobre la resistencia individual de las partículas y la distribución de fuerzas de contacto son el origen del efecto de escala sobre el comportamiento mecánico de un ensamble granular [24]. Frossard [7] presentó un método basado en la probabilidad de ruptura de Weibull [29] con el fin de predecir el efecto de escala en la resistencia de enrocados. Se suponen dos granos (a y b) de diferente diámetro (d_a y d_b) provenientes de la misma roca madre. Entonces, la probabilidad de resistencia de cada grano sometido a un esfuerzo σ está dado por la teoría estadística de la resistencia de materiales de Weibull [29], la cual es descrita como:

$$P(d_a) = \exp\left(-\left(\frac{d_a}{d_{0(a)}}\right)^3 \left(\frac{\sigma_a}{\sigma_{0(a)}}\right)^{m(a)}\right)$$

$$P(d_b) = \exp\left(-\left(\frac{d_b}{d_{0(b)}}\right)^3 \left(\frac{\sigma_b}{\sigma_{0(b)}}\right)^{m(b)}\right) \quad (6)$$

Donde $\sigma_0, d_0,$ y m_0 son parámetros de la ley de probabilidad de Weibull [29]. Como los dos granos tienen la misma minerología y por consiguiente la misma densidad de fisuras internas, estos parámetros son iguales en los dos casos. Además la probabilidad de ruptura de los dos es la misma.

Si se quiere conocer la relación entre los esfuerzos σ_a y σ_b para una misma probabilidad dada, de lo anterior se obtiene:

$$d_a^3 \sigma_a^m = d_b^3 \sigma_b^m$$

$$\sigma_a = \sigma_b \left(\frac{d_b}{d_a}\right)^{\frac{3}{m}} \quad (7)$$

Esto muestra la existencia del efecto de escala debido a las partículas de diferente tamaño. El parámetro m depende de la naturaleza de la roca madre. Numerosos trabajos han permitido proporcionar valores de este módulo para diferentes tipos de roca [13], [14], [19], [20], [21], los cuales varían normalmente desde 1 hasta 5.

La figura 6 muestra el esfuerzo de ruptura de diversos tipos de agregado de roca, los cuales fueron fracturados por medio de ensayos de compresión entre dos placas rígidas paralelas. Se observa que cualquiera que sea el material, la intensidad de los esfuerzos aumenta con la disminución del tamaño de los granos, lo que demuestra el efecto de escala.

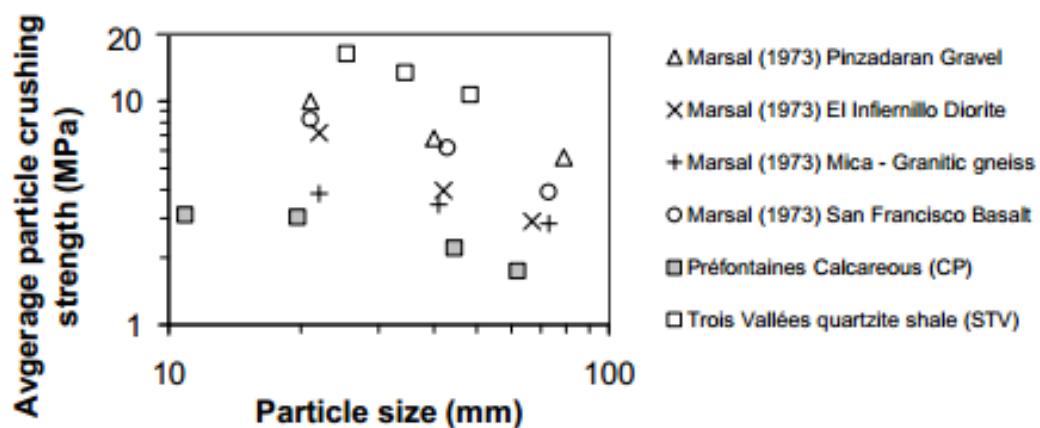


Figura 6. Resultados de resistencia a la ruptura de agregados de roca [24].

2.3.5. Densidad inicial

La probabilidad de ruptura de un grano individual es independiente de su densidad [1], pero en un ensamble granular esta se ve afectada por la densidad del medio granular en conjunto. Una alta densidad del medio se traduce en un aumento del número de contactos por unidad de volumen, en otras palabras, un mayor confinamiento de las partículas, lo que disminuye las fuerzas de contacto.

Además, un material de alta densidad tiene un mayor peso, esto conlleva a que en obras de gran altura los esfuerzos que deben soportar las partículas sean mayores.

2.3.6. Estado hídrico

Los trabajos de Sowers et al. [26], Marsal [18] y Nobari y Duncan [23] sobre gravas han mostrado que la variación de humedad, incluso débil, puede aumentar la compresibilidad del material. Esto se debe a que el agua genera una disminución de la resistencia en las partículas y por consecuencia un aumento en la tasa de ruptura [24]. Este es un factor importante a tener en cuenta en las presas en enrocado, ya que en ocasiones este se mantiene en estado saturado.

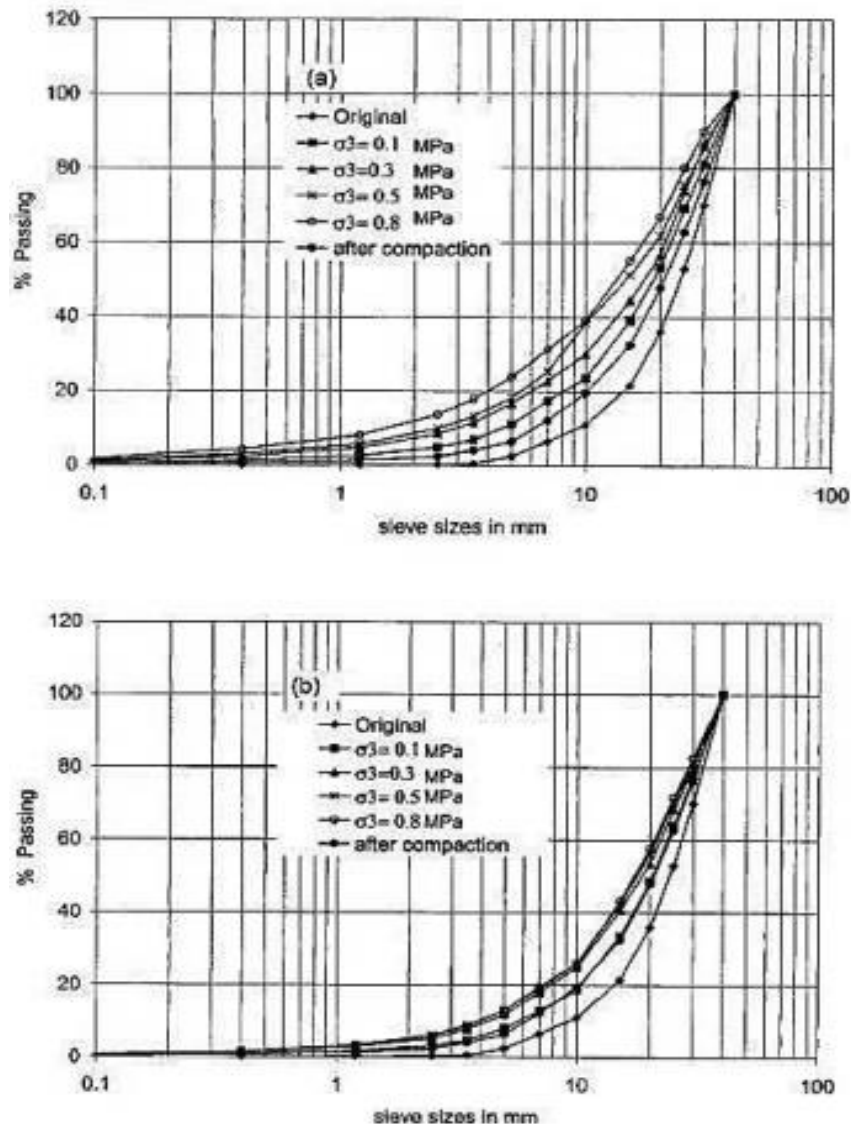


Figura 7. Efecto de la humedad en ensayos triaxiales sobre un enrocado de pizarra. (a) Material saturado. (b) Humedad relativa de 36% [2].

Frossard [7] ha propuesto una teoría con respecto a la capilaridad. La saturación parcial de partículas genera un menisco capilar al interior de las microfisuras, donde las fuerzas capilares actúan como un tirante limitando su abertura, pero cuando las partículas se saturan los meniscos desaparecen facilitando la fisuración [22].

La figura 7 muestra diferentes granulometrías después de ensayos triaxiales sobre muestras de enrocados con un 36% de humedad y en estado saturado, realizados por Chavez y Alonso [2]. De esto se puede constatar que la ruptura de granos aumenta con la saturación.

3. METODO DE ELEMENTOS DISCRETOS (DEM)

Según la definición original propuesta por Cundall y Hart (1992) [3], un Método de Elementos Discretos es cualquier modelo que cuenta con las siguientes características:

- Permite un número finito de desplazamientos y rotaciones entre cuerpos discretos, incluyendo la separación total de estos.
- Reconoce nuevos contactos automáticamente mientras avanza la simulación.

El método de elementos discretos (DEM) es utilizado para el estudio de medios considerados como discontinuos, contrariamente al más conocido método de elementos finitos (FEM), que trabaja sobre el medio continuo. Dicho medio será modelado como un ensamble de elementos, los cuales pueden ser rígidos o deformables. El DEM simula el medio considerando individualmente cada elemento, y aplicando leyes de movimiento y de contacto a cada uno. De esta forma es tomada en cuenta la interacción entre elementos, y se pueden determinar las fuerzas internas que actúan en el medio.

El comportamiento del conjunto de partículas se define en tres etapas (Figura 8): la detección de contactos, la determinación de fuerzas de contacto y el cálculo de los movimientos de los elementos [27].

El DEM ha sido ampliamente usado en investigaciones relacionadas con la mecánica de rocas, y en lo que a este campo concierne [4], [10], [14], [22], [24], [25], [28]. El DEM ofrece la posibilidad de observar los fenómenos locales que aparecen al nivel de la superficie de contacto de los bloques de roca, y de seguir la propagación de fisuras.

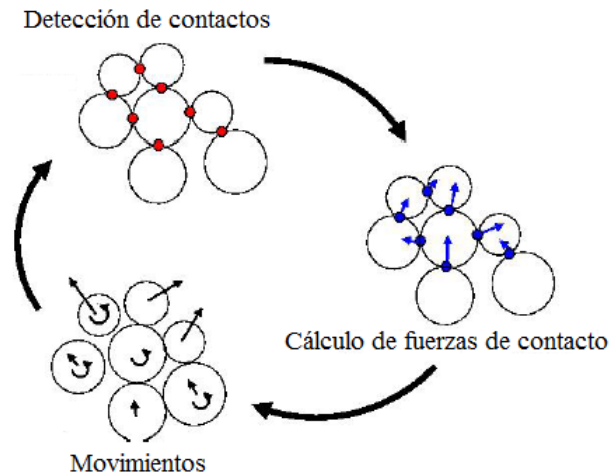


Figura 8. Etapas del análisis de contacto múltiple en un Método de Elementos Discretos (LMGC90)

En la práctica es imposible conocer las fisuras y discontinuidades internas de un bloque de roca, lo que hace difícil pronosticar su modo de ruptura. Por medio de un modelo de elementos discretos es posible definir inicialmente la densidad de planos de fractura, los cuales serán descritos por los planos de contacto de las partículas que componen los elementos. Entre más fina sea la discretización habrán más posibles planos de falla en elemento, y los resultados obtenidos se aproximarán más a la realidad.

El método de elementos discretos presenta aún varias limitaciones. Para realizar un modelo realista por medio de la discretización de elementos, se requiere de un algoritmo eficiente que pueda detectar y describir los contactos, así como la definición de un gran número de elementos con propiedades diferentes, lo que hace que la cantidad de información a procesar sea muy grande y que se necesiten muchos recursos computacionales para su modelización. Es por eso que en los estudios realizados con DEM, se intenta escalar y simplificar al máximo las estructuras modeladas.

3.1. Software LMG90

Para el análisis que se muestra más adelante en este artículo, se utilizó el software libre LMG90, desarrollado por el laboratorio de Mecánica e Ingeniería Civil de la Universidad de Montpellier 2 (Francia). Este software permite le

modelización de grandes colecciones de objetos físicos, rígidos o deformables, así como la evaluación de diferentes leyes de interacción [27]. En el código de LMGC90, el análisis de contacto múltiple entre objetos fue desarrollado sobre el método NSCD (Non Smooth Contact Dynamics).

El método NSCD es un método por elementos discretos que utiliza leyes de interacción irregulares e incluye ecuaciones de dinámica de manera implícita, a diferencia de los métodos clásicos que utilizan funciones continuas y esquemas de integración explícitos [27]. Por consiguiente, en este análisis es necesario establecer leyes de contacto entre partículas que definan la reacción normal y tangencial entre ellas.

3.2. Leyes de Contacto

Para la modelización de un contacto entre dos partículas, es necesario establecer dos leyes de contacto, la que produce una reacción normal entre los dos cuerpos, y la que produce una reacción tangencial [27]. Estas leyes se encuentran normalmente implícitas en la programación de los software de simulación numérica por elementos discretos.



Figura 9. Leyes de contacto contacto entre dos elementos

3.2.1. Ley de Signorini

Establece que dos cuerpos no pueden interpenetrarse, lo que produce una reacción de contacto R_n (ver Figura 9). Por lo que se pueden definir las dos condiciones siguientes:

- Cuando NO hay contacto: $R_n = 0$ y $g > 0$ (9)
- Cuando hay contacto: $R_n > 0$ y $g = 0$ (8)

Donde g es la distancia entre los dos cuerpos.

3.2.2. Ley de Coulomb

Establece una fuerza umbral que debe ser sobrepasada para provocar el deslizamiento entre dos cuerpos en contacto. Esto produce una reacción tangencial R_t que está relacionada con la velocidad de deslizamiento V_t (ver Figura 9). De lo anterior se establecen igualmente dos condiciones:

■ Cuando NO hay deslizamiento:

$$\|R_t\| < \mu \cdot R_n \text{ et } V_t = 0 \quad (10)$$

■ Cuando hay deslizamiento:

$$\|R_t\| = \mu \cdot R_n \text{ et } V_t = -\lambda \cdot \frac{R_t}{\|R_t\|} \quad (11)$$

Donde $\lambda > 0$ y μ es el coeficiente de fricción sobre la superficie de dos cuerpos.

4. MODELACIÓN

4.1. Ensayo de compresión diametral

La resistencia de un bloque de roca puede ser medida por medio de un ensayo de compresión diametral, también conocido como ensayo brasilero. Este ensayo es utilizado para determinar la fuerza de fractura de un espécimen al comprimirlo por su diámetro. El esfuerzo de compresión es aplicado a través de dos placas paralelas y un esfuerzo de tracción interior será entonces inducido en la dirección transversal de la fuerza aplicada.

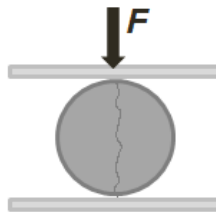


Figura 10. Diagrama de ensayo de compresión diametral

Para este trabajo se realizaron modelos 2D por el método de elementos discretos en el software LMGC90. El primer modelo consiste en una roca circular de 10cm de diámetro representada como un conjunto de cuerpos rígidos, la cual es

sometida a un ensayo de compresión diametral. La carga es aplicada mediante una placa rígida que desciende a una velocidad constante de 0,1cm/s (ver Figura 9). El objetivo de este análisis es observar la ruptura de la roca ante una fuerza controlada ejercida por la placa, por tanto en este y los otros modelos mostrados más adelante no se tuvieron en cuenta las fuerzas gravitacionales sobre las partículas.

Es importante resaltar que el tamaño y la forma de las partículas que componen los elementos son factores importantes a la hora de hacer modelos discretos, ya que definirán la distribución de las fuerzas internas del material y los posibles planos de falla. En este caso la roca se dividió en partículas triangulares definidas mediante un enmallado. La muestra circular está compuesta por 64 partículas diferentes.

Como lo define el método de elementos discretos, los triángulos que componen la muestra son considerados partículas individuales, que se conectan por fuerzas de contacto normales y tangenciales, por ende es necesario definir una ley de interacción entre ellas. Para el contacto entre la muestra y las placas se estableció la ley de rozamiento de Coulomb (Eq. 10 y 11), ya que en este contacto solo existen fuerzas de fricción. Para los contactos interparticulares se definió la ley de contacto de Mohr-Coulomb, ya que existen fuerzas cohesivas que mantienen adheridas las partículas unas a otras. Una vez el contacto cohesivo se rompe, aparece un contacto de rozamiento entre las dos partículas.

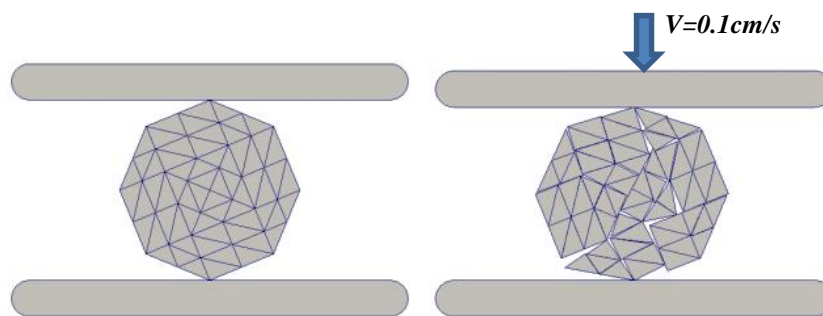


Figura 11. Modelo discreto de ensayo de compresión diametral

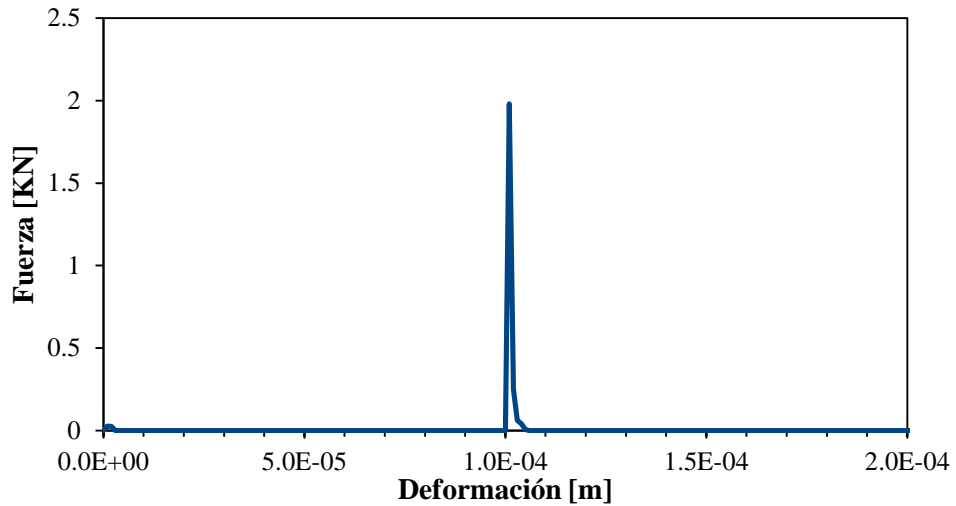


Figura 12. Curva Fuerza vs. Deformación obtenida del modelo del ensayo de compresión diametral.

Al correr el modelo del ensayo, se observa la ruptura del espécimen a los pocos instantes de aplicar velocidad sobre la placa superior. En la Figura 11 se observa que la fractura presentada en el espécimen es de Modo I, ya que las partículas se separan completamente debido a las fuerzas de tracción [13]. Igualmente, la muestra presentó una ruptura frágil, lo cual puede ser confirmado por la variación abrupta de la fuerza sobre la placa superior, mostrado en la curva Fuerza vs. Deformación en la Figura 12. Igualmente, con el modelo es posible determinar las fuerzas interparticulares a lo largo del ensayo. Como se muestra en la Figura 13, se presentan mayores reacciones en las partículas del centro, donde se genera un esfuerzo de tracción que produce la ruptura de la muestra.

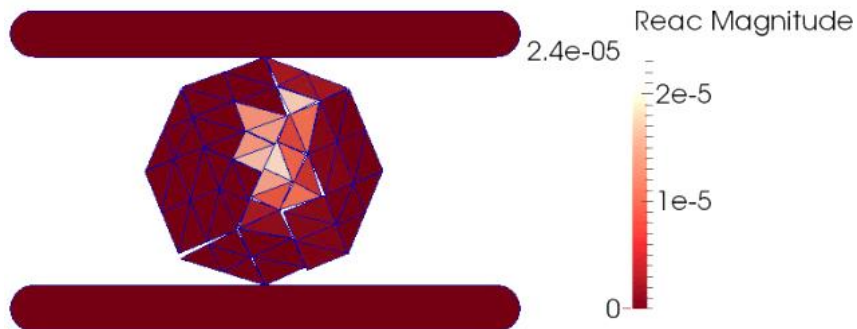


Figura 13. Diagrama de fuerzas internas en el momento de ruptura de una roca de diámetro 10 cm en un modelo discreto.

Con este modelo se quiere ver también la influencia de la cohesión en la resistencia máxima de la roca, por lo que se realizaron varios ensayos con valores diferentes de cohesión. El coeficiente de fricción, definido como $\tan(\varphi) = Coh\ t / Coh\ n$, se estableció como 0,4 para todos los ensayos, lo cual representa la relación entre la fuerzas de cohesión tangencial y normal.

Los valores de resistencia a la tracción obtenidos del ensayo se calculan con los valores de fuerza máxima y utilizando la ecuación de Jaeger (Eq. 4). Los resultados de resistencia obtenidos para cinco valores diferentes de cohesión normal se muestran en la Figura 14, donde es posible observar como la fuerza de ruptura aumenta con la cohesión. No obstante, cabe aclarar que este análisis se realizó con el fin de observar la influencia de la cohesión en la resistencia de un bloque de roca, más no con el fin de encontrar valores de resistencia para tipos de material en específico.

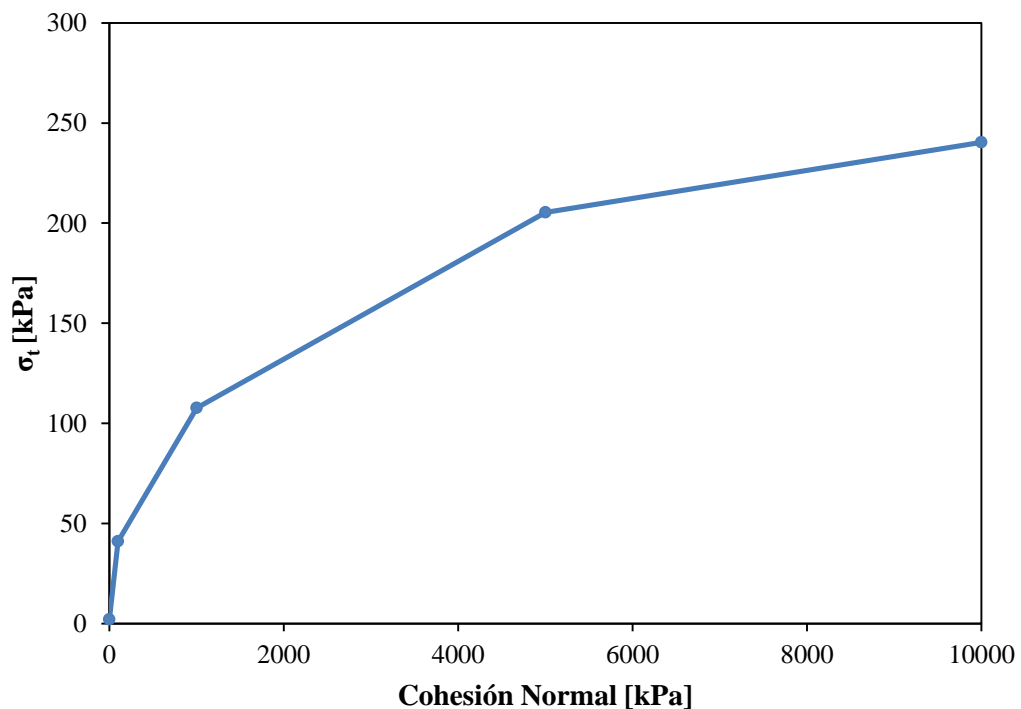


Figura 14. Variación de la resistencia a la tracción en función de la cohesión para una roca sometida a un ensayo de compresión diametral.

Con lo anterior se comprobó que entre más grande sea la cohesión mayor será la fuerza necesaria para generar la ruptura. Esto se explica ya que el aumento de la

cohesión conlleva a un aumento de las fuerzas de contacto que mantienen unidas a las partículas, lo que hace más difícil la ruptura de la roca.

Igualmente, es de interés observar la influencia del tamaño de la muestra en el ensayo de compresión diametral, por lo que se realizó el mismo modelo para muestras de diámetro 5cm y 20cm. Las tres muestras se modelaron con un enmallado de igual densidad y para los mismos valores de coeficiente de fricción, cohesión normal y tangencial (ver Figura 15). En la Tabla 1 se muestran los resultados de resistencia a la tracción obtenidos para los cinco materiales de diferente cohesión.

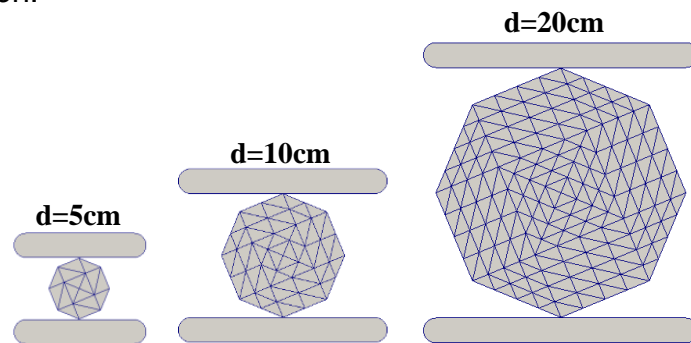


Figura 15. Modelos de ensayo de compresión diametral para muestras de diámetro 5cm, 10cm y 20cm respectivamente.

Comparando los resultados de las tres muestras (ver Figura 16), se observa un claro aumento de resistencia del material con la disminución del tamaño del espécimen, lo que comprueba la existencia de un efecto de escala, el cual fue explicado con detalle anteriormente. No obstante, para el material sin cohesión se observó que la diferencia de resistencia no es tan significativa como lo es para los valores altos de cohesión (ver Tabla 1). Con esto se comprueba que dicha relación de escala es diferente para cada tipo de material.

Tabla 1. Resistencia a la tracción obtenida de modelos de ensayos de compresión diametral para muestras de roca de tres diámetros diferentes.

Material	Cohn [kPa]	Coht [kPa]	σ_t [kPa]		
			d=5 cm	d=10 cm	d=20 cm
1	0	0	8160	2040	1945
2	100	40	164000	41000	2850
3	1000	400	430800	107700	3625
4	5000	2000	821600	205400	7875
5	10000	4000	961600	240400	12310

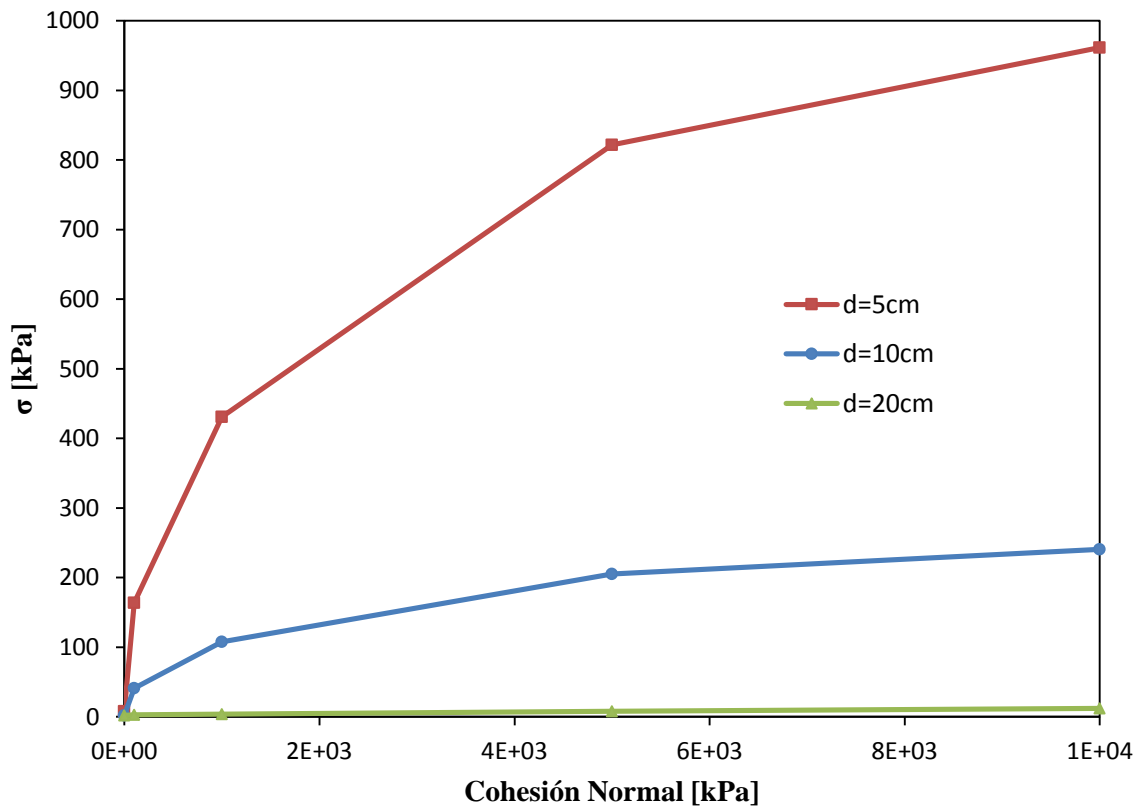


Figura 16. Resistencia a la tracción vs. Cohesión para tres rocas de diferente diámetro sometidas a un ensayo de compresión diametral.

La Ecuación (5) propuesta por Ovalle [24] plantea que la resistencia a la tracción (σ_t) de un espécimen es directamente proporcional a una potencia b de su

diámetro d , siendo dicha potencia un parámetro empírico propio de cada material. En los modelos realizados en este trabajo, la potencia b resulta tener un valor negativo, estableciendo una relación inversamente proporcional entre el diámetro d y la resistencia a la tracción σ_t de la muestra.

4.2. Ensayo de compresión edométrica

El ensayo de compresión edométrica también llamado ensayo de consolidación confinada, es un ensayo de laboratorio que tiene como objetivo determinar la deformación que sufrirá un material granular bajo esfuerzos de compresión unidimensionales en estado de confinamiento. El ensayo consiste en aplicar una fuerza vertical a la muestra con la ayuda de un pistón, mientras se mide la deformación correspondiente al tiempo de carga.

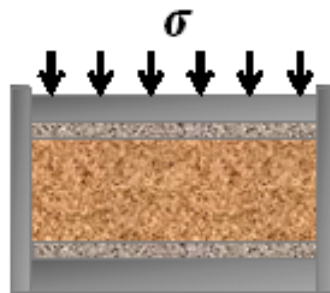


Figura 17. Diagrama de ensayo de compresión edométrica

Para este trabajo se realizaron modelos discretos de ensayos de compresión edométrica de muestras compuestas por varias rocas. Las rocas fueron modeladas como cuerpos rígidos impenetrables, y no se tuvieron en cuenta los efectos de gravedad sobre ellas. Los ensayos mostrados a continuación consisten en muestras comprimidas en una caja rígida de 1mx1m a una velocidad constante de 1cm/s.

4.2.1. Modelo 1: 90 rocas de diámetro 10cm

Se realizó un primer modelo de una muestra con rocas circulares de tamaño uniforme de diámetro 10 cm, modelando las rocas como cuerpos rígidos independientes. Esto se realiza con el fin de ver la distribución de fuerzas entre las

partículas al aplicar un esfuerzo de compresión sobre la muestra. En este análisis se definió el contacto entre partículas con la ley de fricción de Coulomb (Eq. 10 y 11), con un valor de coeficiente de fricción de 0,3.

En la Figura 18 se observa la distribución de fuerzas normales de contacto en el ensamble granular al ser comprimido. Se observa como los esfuerzos se transmiten de un bloque a otro desde la placa superior, que esta en movimiento, hasta la placa inferior. El camino que toman los esfuerzos va a determinar la magnitud de las fuerzas intergranulares, en esta muestra los esfuerzos mayores se concentran en las diagonales, por lo que se predice que los bloques ubicados en esta zona alcanzarán primero la ruptura.

Igualmente, de este modelo se obtiene el número de coordinación de cada partícula, lo cual define su grado de confinamiento. Para esta muestra el número de coordinación promedio de los bloques es de **3,72**.

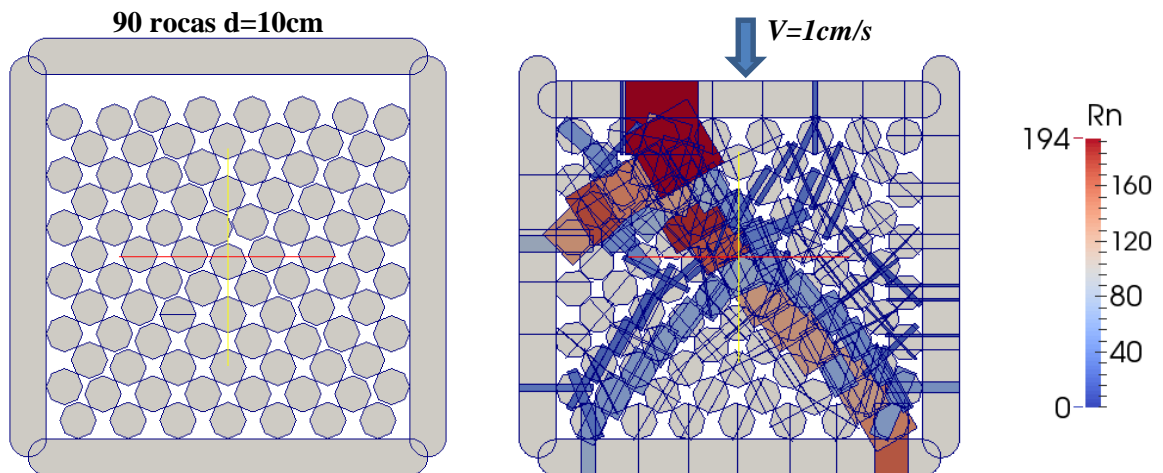


Figura 18. Distribución de fuerzas normales de contacto en un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 10cm.

Se realizó un segundo modelo sobre la misma muestra, ahora con el fin de observar el fenómeno de ruptura de las rocas. En este caso se dividió cada roca en un número determinado de elementos mediante un enmallado, como se muestra en la Figura 20. Debido a la magnitud del modelo y a los altos requerimientos computacionales, se utilizó en este caso un enmallado menos fino que el utilizado en el modelo de compresión diametral. En este modelo cada

bloque circular está compuesto de 16 partículas triangulares independientes y dentro de la caja se introdujeron 90 bloques, por lo que el análisis se realiza sobre un total de 1440 partículas.

En este análisis existen dos tipos de contacto diferentes, el primero es el contacto entre bloques el cual se definió con la ley de fricción de Coulomb (Eq. 10 y 11), con un valor de coeficiente de fricción de 0,3. El segundo es el contacto entre partículas al interior de los bloques, este contacto se definió mediante la ley de Mohr-Coulomb, donde se estableció un valor coeficiente de fricción de 0,4 y diferentes valores de cohesión (ver Figura 19).

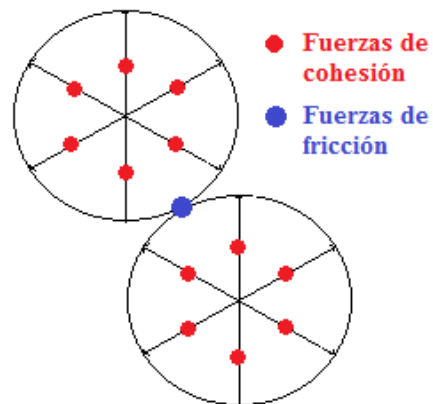


Figura 19. Tipos de fuerzas de contacto en el modelo discreto.

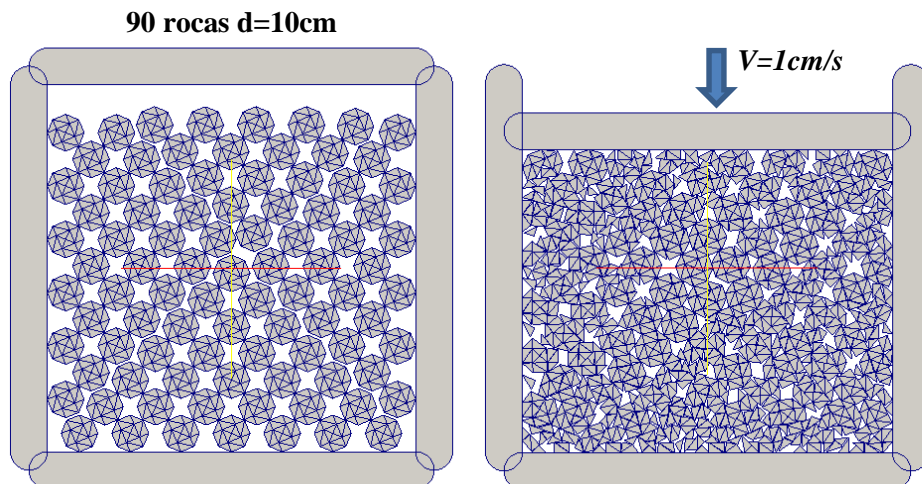


Figura 20. Modelo discreto de un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 10cm.

El seguimiento de la fuerza de compresión es importante para entender el fenómeno de ruptura en materiales granulares, en la Figura 21 se muestra la gráfica Fuerza vs. Deformación del ensayo para una muestra de cohesión normal igual a 1000kPa. Se observa que a medida que se comprime la muestra la fuerza ejercida por la placa superior aumenta y disminuye repetitivamente, estos picos corresponden a la ruptura progresiva de las diferentes rocas, que liberan energía poco a poco durante el ensayo. A medida que las rocas se van fracturando los picos de fuerza aumentan, hasta un punto donde la fuerza crece rápidamente, esto ocurre en el momento en que quedan muy pocos vacíos y es por ende muy difícil seguir compactando la muestra.

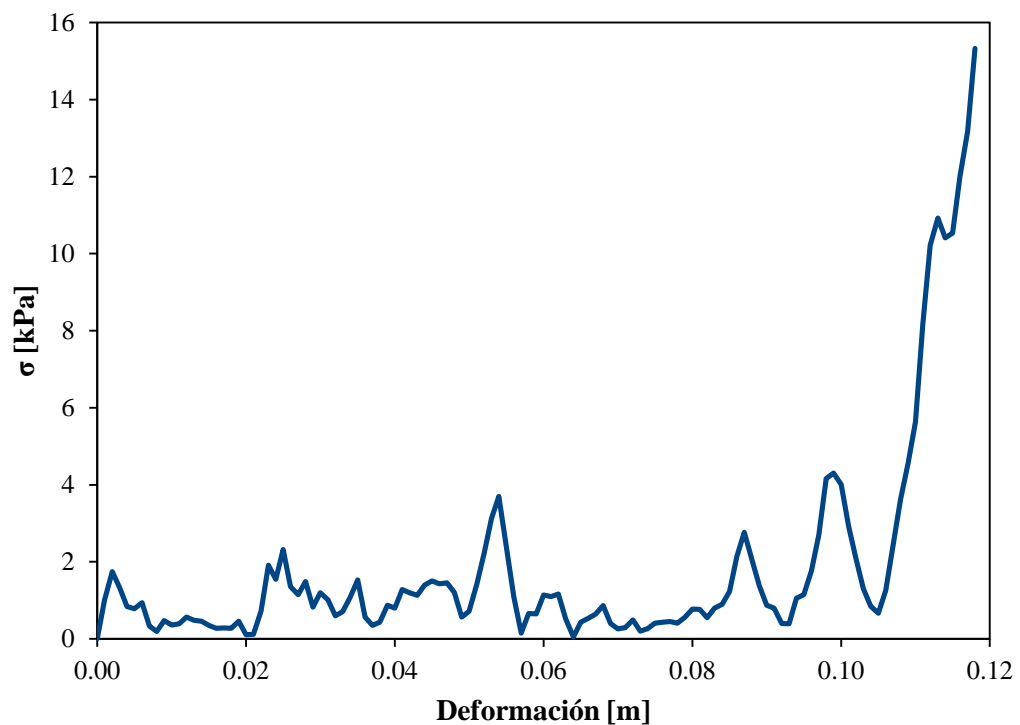


Figura 21 . Curva Fuerza vs. Deformación obtenida del modelo del ensayo de compresión diametral (Modelo 1).

El ensayo se realizó con diferentes valores de cohesión de donde se pudo constatar nuevamente que la resistencia del material es directamente proporcional a su cohesión. En la Figura 22 se muestran los valores de Fuerza vs. Deformación durante los primeros de 6cm de compactación para tres muestras de diferente cohesión. Se observa que la muestra con mayor cohesión (1000 kPa) presento una fuerza mayor durante casi todo el ensayo, seguida de la muestra de cohesión

10 kPa y por último la muestra sin cohesión que requirió en general menores fuerzas.

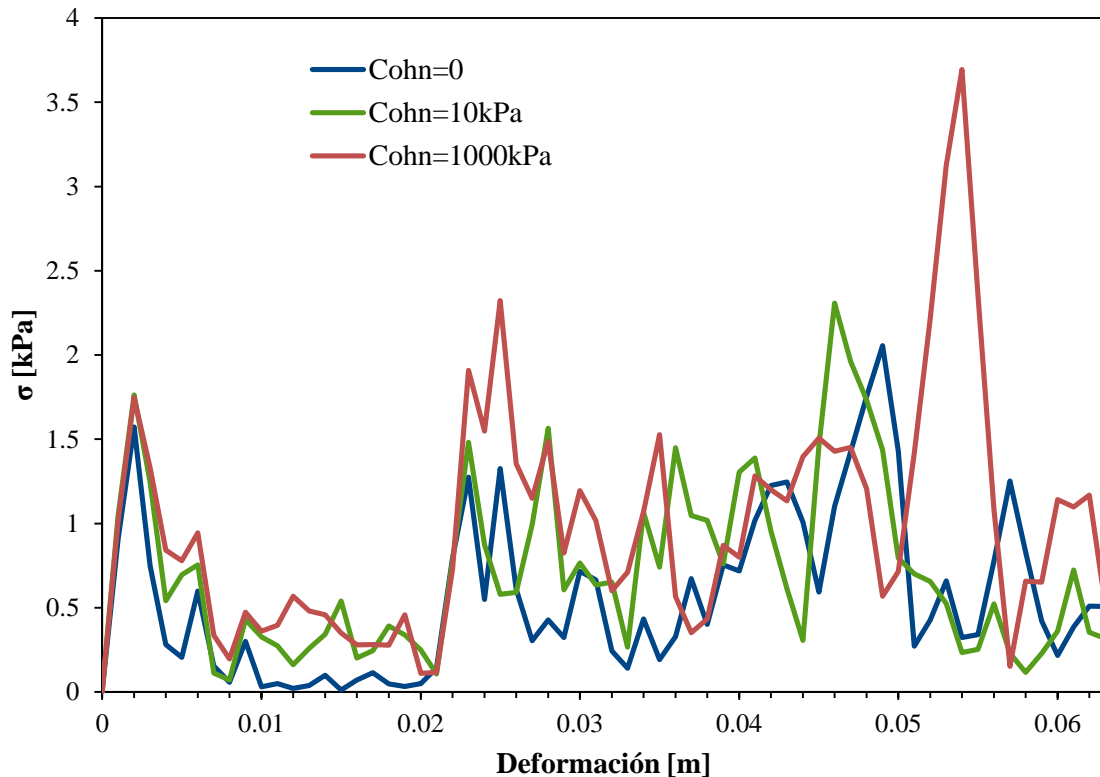


Figura 22. Comparación de curvas Fuerza vs. Deformación para tres materiales de cohesión diferente

Igualmente, es de interés conocer el nivel de compresibilidad del material, lo cual representa su susceptibilidad a la ruptura, para esto se traza una curva de compresibilidad con los datos obtenidos del modelo (ver Figura 23). Esta curva presenta también muchos picos debido a la variación de la fuerza durante el ensayo al ocurrir la ruptura de bloques individuales, como en este caso nos interesa obtener la compresibilidad de todo el ensamble granular y no de bloques por separado, es posible trazar una línea de tendencia de toda la curva. Dado que el material es rígido, la curva de compresibilidad no presenta una parte de deformación elástica, solo deformación plástica. La pendiente de la zona de comportamiento plástico está definida como el índice de compresión, por lo que de la gráfica se obtiene: **Cc=0,0261**.

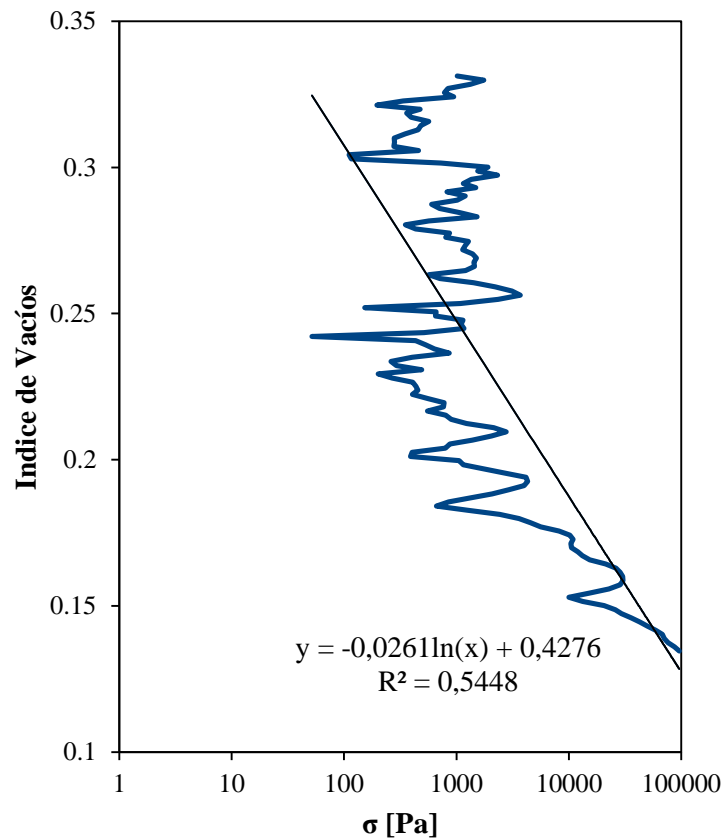


Figura 23 Curva de compresibilidad de la muestra obtenida del ensayo de compresión diametral (Modelo1).

4.2.2. Modelo 2: 21 rocas de diámetro 20cm

Ahora es de interés ver la influencia del tamaño de la roca en la resistencia de la muestra. De esta manera se realizó un modelo de un nuevo ensayo edométrico sobre una muestra compuesta de rocas más grandes, de diámetro 20cm.

En la Figura 24 se muestra un primer modelo, donde es posible observar la distribución de fuerzas normales de contacto entre los bloques en un momento del ensayo. Se observa el camino de esfuerzos desde la placa superior, hasta las paredes laterales y la placa inferior, este camino determina la magnitud de las fuerzas durante el ensayo y por ende los bloques que sufrirán primero la ruptura. El número de coordinación de los bloques de esta muestra tiene un valor promedio de **3,48**.

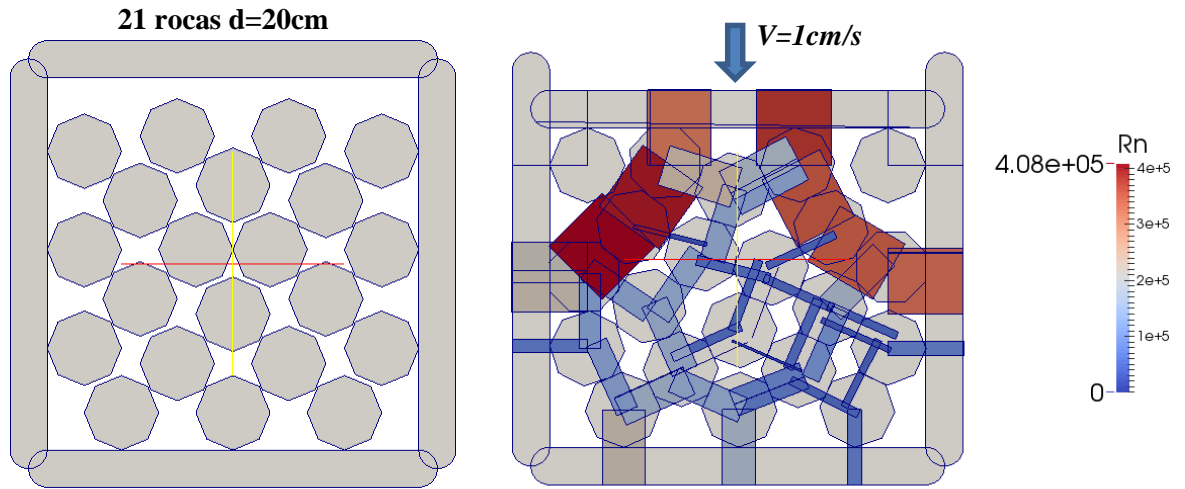


Figura 24. Distribución de fuerzas normales de contacto en un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 20cm.

Ahora se realiza un modelo para observar el fenómeno de ruptura sobre los bloques. En este caso se divide cada bloque por medio un enmallado con el mismo tamaño de partículas que en el modelo anterior, por lo que esta vez cada bloque está compuesto de 64 partículas, para un total de 1344 sobre todo el modelo (ver Figura 25). Igual que en el modelo anterior, para los contactos interparticulares se definió la fuerza de cohesión normal de 1000 kPa y coeficiente de fricción de 0,4.

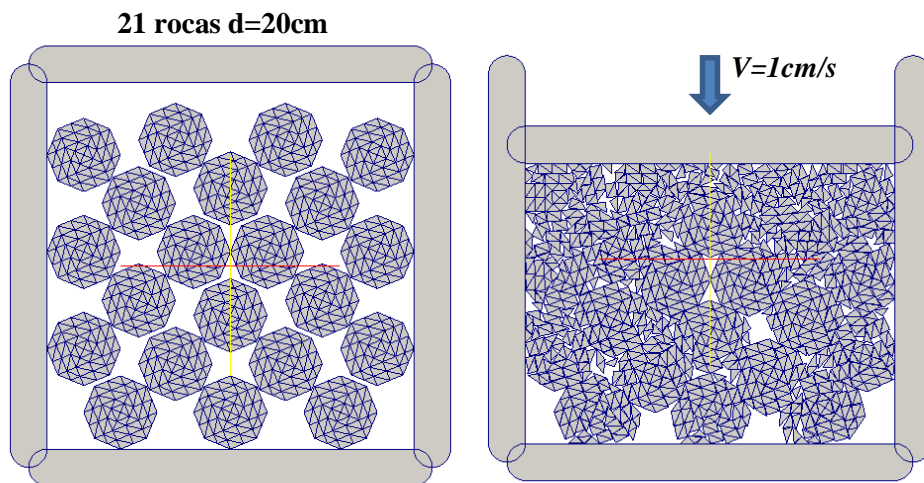


Figura 25. Modelo discreto de un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 20cm.

La fuerza sobre la placa tuvo un comportamiento similar al del ensayo anterior, presenta igualmente varios picos a medida que ocurren las rupturas dentro de los bloques. A pesar de esto, haciendo una comparación entre las gráficas Fuerza vs. Deformación de los dos ensayos (ver Figura 26), se observa que la fuerza en el material más fino tuvo un crecimiento mucho más rápido

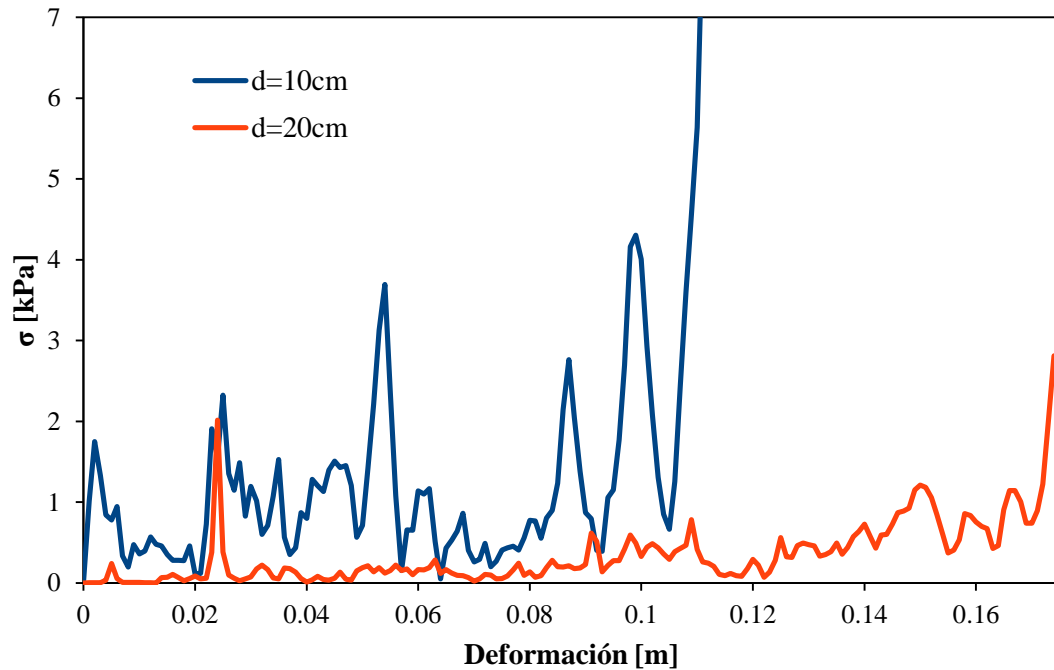


Figura 26. Comparación de curvas Fuerza vs. Deformación obtenidas de los modelos 1 y 2

De igual forma se trazó la curva de compresibilidad de esta muestra (ver Figura 27), de la cual se obtuvo el siguiente índice de compresión **Cc=0,0327**. Este valor es mucho mayor que el obtenido con los bloques de diámetro 10cm y esto indica que el material es más fácil de compactar, lo cual se espera ya que tiene una mayor cantidad de vacíos.

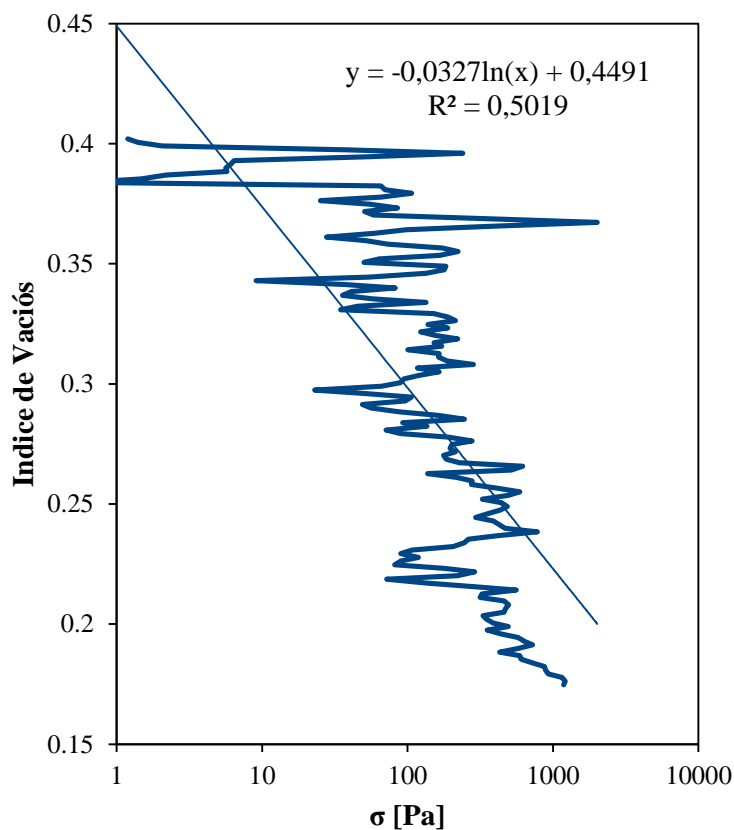


Figura 27. Curva de compresibilidad de la muestra obtenida del ensayo de compresión diametral (Modelo 2).

4.2.3. Modelo 3: Rocas de radios 10cm y 20cm distribuidas aleatoriamente.

Igualmente, se quiso probar la influencia de la granulometría en la resistencia del ensamble granular, es por esto que se realizó un nuevo modelo de una muestra compuesta de bloques de los dos tamaños trabajados anteriormente 10cm y 20cm. El material está compuesto de 70% bloques de 10cm y 30% de bloques de 20cm y su distribución fue determinada aleatoriamente.

En la Figura 28 se muestra un primer modelo de la muestra comprimida donde se observa la distribución de fuerzas normales de contacto entre los bloques rígidos, el camino de esfuerzos desde la placa superior a la inferior determina los bloques que sufrirán primero la ruptura. El número de coordinación de los bloques de esta muestra tiene un valor promedio de **4,14**, mayor al de las dos muestras anteriores

con granos de tamaño uniforme, lo que indica que en este caso las partículas están mejor confinadas.

16 rocas d=20cm. 26 rocas d=10cm

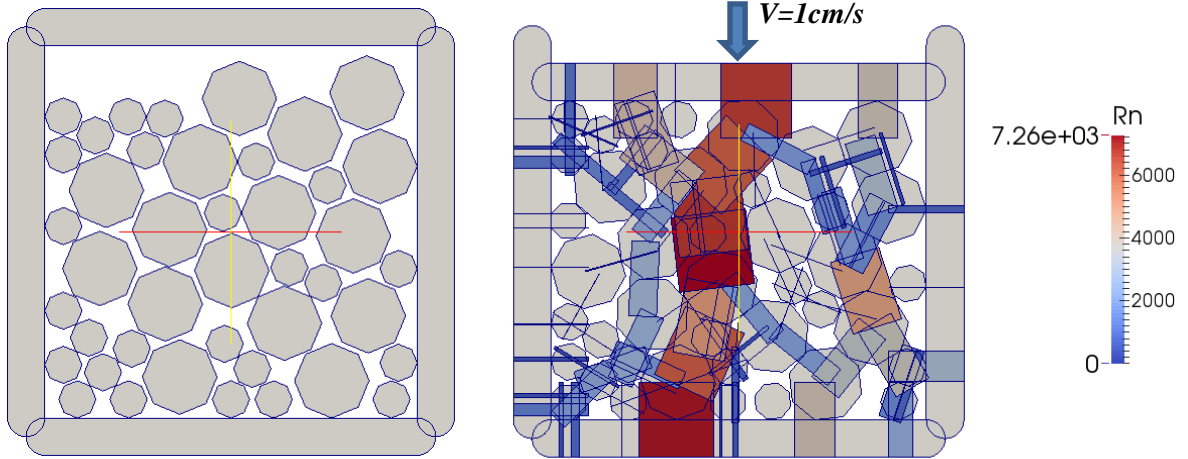


Figura 28 . Distribución de fuerzas normales de contacto en un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetro 10cm y 20cm.

Ahora se muestra el modelo más discretizado para observar la ruptura de los bloques. En este caso la distribución de los bloques puede afectar mucho la resistencia de la muestra, por lo que se realizaron tres modelos con diferente distribución aleatoria de partículas (ver Figura 29). Uno de los modelos se muestra en la Figura 30 donde se observa que los diferentes tamaños de rocas permiten una mejor distribución de estas, dejando menos vacíos entre ellas.

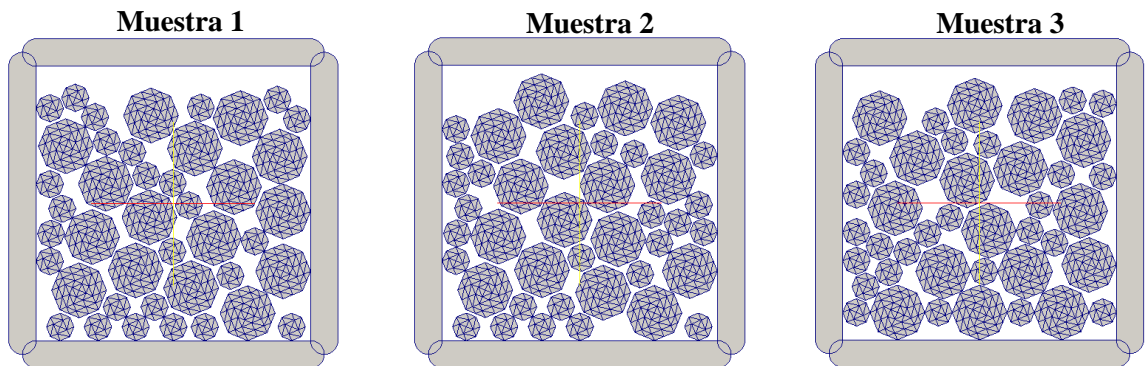


Figura 29. Modelos con diferente distribución aleatoria de partículas

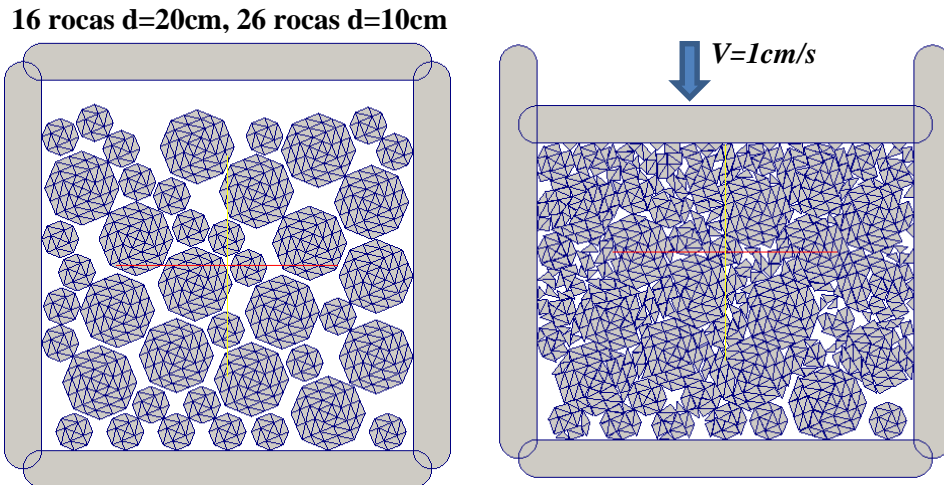


Figura 30. Modelo discreto de un ensayo de compresión edométrica, rocas de diámetros 10cm y 20cm distribuidas aleatoriamente.

Al igual que en los ensayos anteriores, la fuerza sobre la placa tuvo varias fluctuaciones equivalentes a la ruptura progresiva de los granos, y esta fuerza fue creciendo a medida que fueron disminuyendo los vacíos en la muestra (ver Figura 18).

Luego de correr el modelo y obtener los valores de esfuerzo y deformación, se trazaron igualmente las curvas de compresibilidad para las tres muestras, con las que se obtuvieron los siguientes índices de compresión: $Cc_1=0,0232$, $Cc_2=0,0233$, $Cc_3=0,0236$. En general las curvas presentaron un comportamiento similar a los dos modelos anteriores (ver Figura 31). Con el fin de hacer la comparación con las otras muestras de diferente granulometría, se calculó la media de los valores de Cc obtenidos en últimos tres ensayos: **$Cc=0,0234$** .

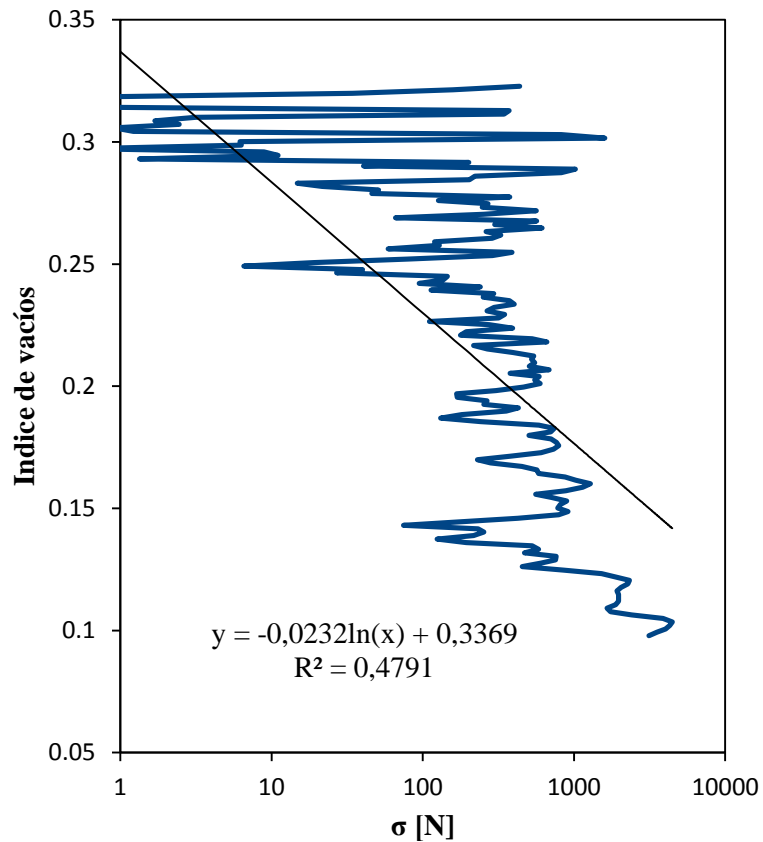


Figura 31. Curva de compresibilidad de la muestra obtenida del ensayo de compresión diametral (Modelo 2, Muestra 1).

4.3. Análisis de resultados

Finalmente, se puede realizar una comparación entre los resultados de las tres muestras con diferentes granulometrías (ver Figura 32). En general, se observó que el índice de compresión C_c es más alto en el modelo 2, compuesto por rocas de diámetro 20cm, seguido del modelo 1, compuesto por rocas de diámetro 10 cm, y por último el modelo 3, compuesta de rocas de los dos tamaños.

Es posible relacionar estos resultados con los valores de número de coordinación de las muestras, puesto que este número representa el grado de confinamiento de partículas. La muestra del modelo 3 presento el mayor número de coordinación promedio, con un valor de 4,14, seguido del modelo 1 con un número de coordinación de 3,72 y finalmente el modelo 2 con un número de coordinación de 3,48, lo que comprueba que a mayor confinamiento de las partículas menor compresibilidad del material.

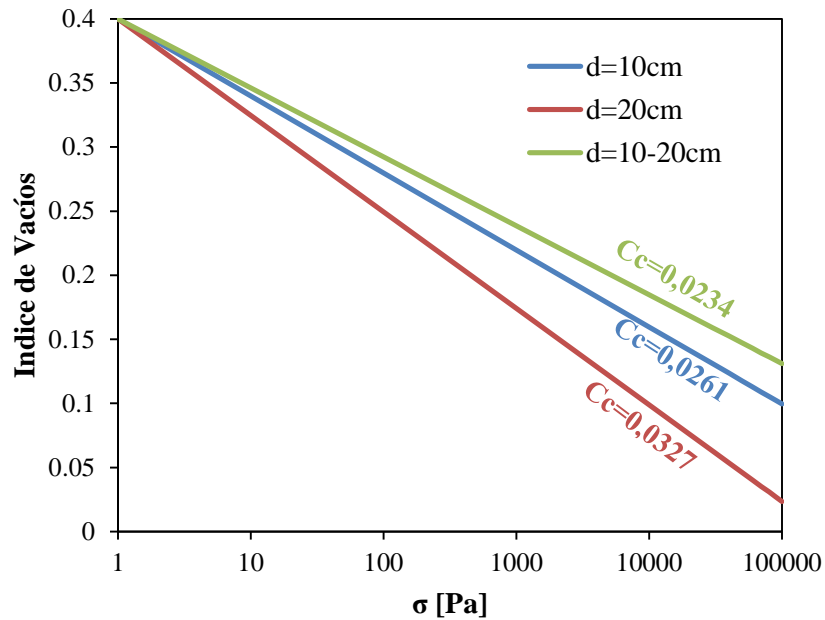


Figura 32. Comparación de curvas de compresibilidad para las muestras de los tres modelos.

Igualmente, los resultados demuestran la gran influencia del tamaño de los bloques en la resistencia de un ensamble granular. El tamaño de los bloques influye en la cantidad de vacíos existentes en el medio y por ende en el grado de confinamiento de cada elemento, es por esto que la muestra con bloques más pequeños tiene mayor resistencia a ser compactada. Además, de los datos obtenidos en el modelo de ensayo de compresión diametral, se comprobó el efecto de escala en la resistencia del material debido al tamaño del bloque, los bloques más grandes al tener más discontinuidades tienen una mayor probabilidad de ruptura [18], lo que afecta también la resistencia de todo el ensamble granular en conjunto y explica los resultados obtenidos en el modelo del ensayo edométrico.

Por último, se pudo observar la influencia en la granulometría del ensamble granular en su resistencia. La heterogeneidad en el tamaño de los bloques permite una mejor distribución de las partículas, dejando menos vacíos entre ellas y aumentando los puntos de contacto. Como se dijo anteriormente al multiplicar los puntos de contacto entre sus elementos se disminuye la intensidad de fuerzas interparticulares, lo que disminuye la probabilidad de ruptura de cada bloque. Es por esto que la muestra del modelo 3 presentó el menor índice de compresión.

5. CONCLUSIONES

El gran tamaño y heterogeneidad de los bloques en los enrocados, hace importante la evaluación de las fuerzas de contacto entre las partículas, lo que justifica la utilización de un modelo discreto. Se ha observado que cada uno de los bloques que componen un enrocado presenta un comportamiento diferente y que su respuesta a esfuerzos dependerá tanto del estado de los bloques adyacentes como de sus propiedades fisicomecánicas individuales, tales como la cohesión, la forma y el tamaño.

Al aplicar carga a un enrocado ocurren dos fenómenos: primero, el reordenamiento de partículas, ocupando los vacíos dejados al momento de la disposición del material, y segundo, la ruptura de rocas, lo cual conlleva nuevamente a un reordenamiento de las partículas. Este ciclo se repite a medida que se aplica carga, generando asentamientos progresivamente. En los modelos realizados se observó que estos dos fenómenos están relacionados con la granulometría del material, entre más heterogéneo sea el material, menos vacíos habrán en el medio y por ende mejor confinadas estarán las partículas, por lo que su compactación será más difícil de lograr.

De lo anterior se puede concluir que para disminuir los asentamientos en un enrocado es importante considerar en su diseño un material con una granulometría heterogénea donde exista la mayor cantidad de contacto entre los bloques.

Según la ley de Mohr-Coulomb, al aumentar la cohesión y el ángulo de fricción de un material se aumenta su resistencia al corte. Esto puso ser comprobado con el modelo de compresión diametral, donde se observó que al aumentar las fuerzas de cohesión entre las partículas, se requirió una mayor fuerza para fracturar la roca. Así mismo, al tener mayor cohesión en el material de un enrocado, aumentará su resistencia global, ya que cada roca tendrá una mayor resistencia a la ruptura.

A pesar de que los modelos realizados muestran una aproximación del comportamiento típico de materiales granulares de grandes dimensiones, no representan modelos de enrocados en estado real, se trata solo de modelos de ensayos de compresión de laboratorio sobre un material con el cual podría ser construido el enrocado. Existen muchos factores que es necesario tener en cuenta si se quiere realizar un modelo acertado de una presa en enrocado. Por

ejemplo, en un enrocado las capas inferiores están sometidas a esfuerzos de compresión mayores debido al peso de las capas superiores, por lo que es necesario realizar un modelo donde se tengan en cuenta las fuerzas gravitacionales o se apliquen esfuerzos diferentes a cada capa de material. Igualmente, otros factores como la humedad pueden cambiar la cohesión del material e influir en su probabilidad de ruptura, y este es un parámetro muy influyente en presas en enrocado, las cuales pueden estar en estado saturado. No obstante los modelos aquí realizados han comprobado varias particularidades en el comportamiento de este tipo de materiales, información que es útil a la hora de diseñar y evaluar obras en enrocado.

Finalmente, los modelos aquí mostrados han comprobado la efectividad del método de elementos discretos para modelar materiales granulares. Un modelo de este mismo tipo, a una mayor escala y considerando otros parámetros, podría ser utilizado para estudiar obras de gran magnitud como las presas en enrocado. No obstante, es importante tener en cuenta que la calidad de un modelo por elementos discretos dependerá siempre del número de partículas modeladas y la elección adecuada de sus leyes de contacto.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anthiniac, Patrice. (1999) : Modélisation hydroplastique des enrochements de barrage en éléments finis. Thèse de Doctorat, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille, France.
- [2] Chávez C., Alonso, E. (2003): A constitutive model for crushed granular aggregates which includes suction effects. *Soils Found* 43(4), 215-227
- [3] Cundall PA, Hart RD, (1992): Numerical modelling of discontinua. *Engineering Computations* 9, pp 101-113.
- [4] Deluzarche, Remi (2004): Modélisation discrète des enrochement-Application aux barrages. Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lyon, France.
- [5] Einav, I. (2007a): Breakage mechanics. *J. Mech. Phys. Solids* 55(6), pp 1274--1320.
- [6] Einav I. (2007b): Soil mechanics: breaking ground. *Phil. Trans. R. Soc. A.* 365,pp 2985-3002
- [7] Frossard, E. (2009): Scale effects in granular fillshear strength and in stability of large rockfill structures. XVIIth ICSMFE, Alexandria, Egypt, 5-9 Oct. 2009
- [8] Guyon E., Troadec J.-P. (1994): *Du sac de billes autas de sable*. Editions Odile JACOB Sciences, Paris.
- [9] Hardin, B.O. (1985): Crushing of soil particles. *J.Geotech. Eng.* 111(10), pp 1177-1192
- [10] Jaeger, J.C. (1967): Failure of rocks under tensile conditions. *Int. J. Rock. Min. Sci.* 4, pp 219-227.
- [11] Khanal Manoj, Schubert Wolfgang, Tomas Jurgen (2005): DEM simulation of diametrical compression test on particle compounds, *Granular Matter*, n° 7, pp 83–90.
- [12] Lee K.L, Farhoomand I. (1967): Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Can. Geotech. J.* 4(1), 68-86
- [13] Lim, W. L., McDowell, G. R., Collop, A. C. (2004): The application of Weibull statistics to the strength of railway ballast. *Granular Matter* 6, pp 229–237
- [14] Lobo-Guerrero, S. & Vallejo, L. E. (2005): Crushing a weak granular material: experimental numerical analyses. University of Pittsburgh, USA. *Géotechnique*55, n° 3, pp 45–249.
- [15] Luong, M. (1998): Basic fracture modes and breakage resistance of granite. *Advances in Rock Mechanics*, ed. By YunMei Lin, World Scientific 1998, pp. 3-17.

- [16] Marachi, N.D., Chan, C.K., Seed, H.B., Duncan, J.M.(1969): Strength and deformation characteristics of rockfills materials. Report No. TE-69-5, Department of civil engineering, University of California, Berkeley, USA.
- [17] Marsal, R. (1967): Large-scale testing of rockfill materials. J. Soil Mech. Found. Div. ASCE 93(SM2), pp 27-44
- [18] Marsal, R. (1973): Mechanical properties of rockfill dams, Ed. Hirschfeld, R. y Poulos, S., Embankment-dam engineering: Casagrande Volumen. New York, Wiley, pp 454.
- [19] McDowell, G.R. (2002): On the Yielding and Plastic Compression of Sand. Soils Found. 42(1), pp 139-145
- [20] McDowell, G. R., Amon, A.: (2000) The application of Weibull statistics to the fracture of soil particles. Soils Found. 40(5), pp 133–141
- [21] Nakata, Y., Hyde, A.F.L., Hyodo, M., Murata, H. (1999): A probabilistic approach to sand particle crushing in the triaxial test. Géotechnique 49(5), pp 567-583
- [22] Nieto Gamboa, Christian J. (2011). Mechanical behavior of rockfill materials, application to concrete face rockfill dams. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Paris, France.
- [23] Nobari, E., Duncan, J. (1972): Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams, International Report N°.TE-72-1, University of California, pp. 1-186
- [24] Ovalle Ortega, C. (2013). Contribution à l'étude de la rupture des grains dans les matériaux granulaires. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France.
- [25] Silvani. C., Bonelli, S., Désoyer, T.(2007). Fracture of rigid solids: a discrete approach based on damaging interface modelling. C. R. Mécanique 334, pp 455-460.
- [26] Sowers, G., Williams, R., Wallace, T. (1965): Compressibility of broken rock and settlement of rockfills. Proc., 6th ICSMFE, Montreal, Vol. 2, pp 561-565.
- [27] Taforel, Paul (2013) : Méthode NSCD – Aspects généraux et cadre théorique.
- [28] Tsoungui, Oliver (1999): Numerical model of crushing of grains inside two-dimensional granular materials, Powder Technology, n° 105, pp 190–198.
- [29] Weibull, W. (1939): A statistical theory of the strength of materials. Proc. Roy. Swedish Inst. Eng. Res. 151