



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA DE MINAS**

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE MINERAL SATURADO DE MINA  
DIABLO REGIMIENTO, CODELCO, DIVISIÓN EL TENIENTE**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS**

**KENJI ANDRÉS BASAURE MATSUMOTO**

**PROFESOR GUÍA:  
JAVIER VALLEJOS MASSA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
RAÚL CASTRO RUIZ  
RICARDO MOFFAT COVARRUBIAS**

**SANTIAGO DE CHILE**

**2014**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas  
**POR:** Kenji Basaure Matsumoto  
**PROFESOR GUÍA:** Javier Vallejos Massa

**CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DE MINERAL SATURADO DE MINA  
DIABLO REGIMIENTO, CODELCO, DIVISIÓN EL TENIENTE**

El bombeo de barro corresponde a un ingreso repentino de mineral saturado a labores subterráneas. Puede provocar daño a las personas y equipos, retrasos en producción, dilución y cierre de faenas.

El presente trabajo tiene por objetivo caracterizar mediante ensayos geotécnicos de laboratorio, el mineral con potencial a producir bombeos de barro en la Mina Diablo Regimiento, División El teniente, Codelco, Chile.

De la revisión bibliográfica y de antecedentes se identifican 2 posibles mecanismos que podrían generar un estallido de barro. Estos corresponden a: exceso de humedad y falla de flujo. En el presente estudio, se evalúa el mecanismo de exceso de humedad.

Se cuenta con 3 muestras provenientes de puntos de extracción cerrados por peligro de bombeos de barro en Diablo Regimiento, que representan los 3 tipos de mineral saturado fino que se encuentran en la mina. Se realiza ensayos de granulometría, gravedad específica, densidad, límites de consistencia, consolidación edométrica, compresión no confinada y, asentamiento.

Se identifica los minerales evaluados como gravas y arenas bien graduadas con contenido de limos y arcillas. Se obtiene la gravedad específica, densidades máximas y mínimas, y se obtiene los límites de Atterberg líquido y plástico, que corresponden a las humedades para las cuales los finos del mineral cambian su comportamiento de sólido a plástico y de plástico a líquido.

Además de la caracterización geotécnica, se evalúa la resistencia del material ante condiciones no confinadas, variando la densidad y la humedad. Esto permite observar que la variable de más relevancia en cuanto a la resistencia del mineral es la densidad, puesto que además de influir directamente en la resistencia, limita la cantidad de humedad que el mineral puede albergar, por lo que la densidad controla parcialmente la humedad.

Se utiliza clasificaciones de la resistencia y asentamiento de materiales para definir límites de humedad líquidos y plásticos análogos a los de Atterberg, pero que cuentan con la ventaja de clasificar materiales con mayor tamaño máximo que estos.

Se concluye que el método utilizado por El Teniente para prevenir bombeos de barro, puede ser actualizado y mejorado. Se recomienda continuar el estudio con el comportamiento confinado del mineral, lo que permitiría evaluar también el mecanismo de falla de flujo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi familia, mis padres, hermanos, tíos y abuelos. Gracias por el apoyo incondicional, por la palabra de aliento en momentos difíciles, y por el buen consejo que siempre me dieron.

A mis amigos, a los de chiquitito, que siempre estuvieron ahí apoyando y siempre crean las instancias para para distraerse y relajarse. A los amigos de la U, por todos esos buenos momentos, las ventanas entretenidas, los almuerzos conversados, los panoramas inesperados y las amenas tardes y noches de estudio.

A mis profesores Javier Vallejos y Raúl Castro, por darme la oportunidad de aportar en este entretenido proyecto, gracias por sus oportunos consejos y guía. Agradezco también a los profesores Ricardo Moffat por sus correcciones que me permitieron seguir aprendiendo sobre lo trabajado, y Paulo Herrera por sus comentarios y preguntas en las reuniones.

Al resto del equipo del barro, por la grata compañía y apoyo en las dudas, materiales, presentaciones y cuanta cosa nos ha tocado hacer.

A las personas que colaboraron desde Codelco, división El Teniente con su experiencia, logística y conocimientos para que este trabajo se pudiese realizar de buena manera. En especial a Mauricio Meléndez y Manuel Salazar por facilitar la extracción y entrega de muestras, a Eduardo Diez por la valiosa información sobre el mineral que me envió y comunicó en terreno y a Ricardo Vargas por facilitar las visitas a terreno en Diablo Regimiento.

Agradezco también Omar Gonzales y Mario Carrillo del laboratorio de sólidos, por apoyarme cuando necesité ayuda y los gratos momentos que pasé en el laboratorio. También a David por acompañarme a buscar las muestras, a Carlo por las gestiones para los terrenos.

A la sección de hormigones del IDIEM por facilitarme el cono de Abrams de forma oportuna e interesarse en el trabajo que estaba realizando.

## TABLA DE CONTENIDO

|       |                                                 |    |
|-------|-------------------------------------------------|----|
| 1     | Introducción .....                              | 1  |
| 1.1   | Antecedentes .....                              | 1  |
| 1.2   | problemática.....                               | 2  |
| 1.3   | Objetivos .....                                 | 3  |
| 1.3.1 | Objetivos generales .....                       | 3  |
| 1.3.2 | Objetivos específicos.....                      | 3  |
| 1.4   | Alcances .....                                  | 3  |
| 1.5   | Contenidos de la memoria.....                   | 3  |
| 2     | Revisión bibliográfica .....                    | 4  |
| 2.1   | Mecanismos de bombeo de barro.....              | 4  |
| 2.2   | Características de los suelos .....             | 8  |
| 2.2.1 | Distribución de Tamaños .....                   | 8  |
| 2.2.2 | Sistema trifásico .....                         | 8  |
| 2.2.3 | Límites de Atterberg.....                       | 11 |
| 2.2.4 | Ordenamiento de partículas (compactación).....  | 11 |
| 2.3   | Comportamiento mecánico de suelos.....          | 13 |
| 2.3.1 | Teoría de falla de mohr-coulomb .....           | 13 |
| 2.3.2 | Consolidación.....                              | 15 |
| 2.3.3 | Asentamiento y extensión de flujo .....         | 16 |
| 2.4   | Agregados granulares con sobre tamaños .....    | 17 |
| 2.5   | Caso de estudio IOZ, Freeport (1998).....       | 18 |
| 2.5.1 | Propiedades geotécnicas.....                    | 19 |
| 2.5.2 | Conclusiones: Condiciones para fluir.....       | 20 |
| 2.6   | Conclusiones de la revisión bibliográfica ..... | 21 |
| 3     | Metodología .....                               | 23 |
| 3.1   | Muestreo.....                                   | 23 |
| 3.2   | Ensayos de laboratorio .....                    | 25 |
| 4     | Resultados .....                                | 26 |
| 4.1   | Humedad natural .....                           | 26 |
| 4.2   | Granulometría .....                             | 26 |

|       |                                         |    |
|-------|-----------------------------------------|----|
| 4.3   | Límites de Atterberg.....               | 28 |
| 4.4   | Gravedad específica .....               | 28 |
| 4.5   | Densidad máxima y mínima.....           | 29 |
| 4.6   | proctor modificado .....                | 29 |
| 4.7   | Compresión no confinada.....            | 29 |
| 4.8   | Asentamiento y extensión de flujo ..... | 34 |
| 4.9   | Ángulo de fricción.....                 | 36 |
| 4.10  | Consolidación.....                      | 36 |
| 5     | Análisis de resultados.....             | 39 |
| 5.1   | Representatividad de ensayos.....       | 39 |
| 5.2   | Clasificación del mineral.....          | 39 |
| 5.3   | Índice de vacíos.....                   | 41 |
| 5.4   | Cohesión.....                           | 42 |
| 5.4.1 | Humedades límite.....                   | 45 |
| 5.5   | Asentamiento y Fluidez.....             | 46 |
| 5.5.1 | Humedades límite.....                   | 48 |
| 5.6   | Envoltentes Mohr-Coulomb .....          | 51 |
| 5.7   | Consolidación.....                      | 51 |
| 5.8   | Resumen de Caracterización .....        | 52 |
| 5.9   | Comparación con resultados IOZ.....     | 53 |
| 6     | Conclusiones y Recomendaciones .....    | 54 |
| 7     | Bibliografía .....                      | 56 |
| 8     | Anexos.....                             | 58 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Matriz de peligro de bombeo de barro para puntos de extracción, El Teniente n (Becerra, 2011) .                                                                              | 1  |
| Figura 2: Elementos necesarios para que se produzca bombeo de barro. Figura adaptada de (Butcher, et al., 2000). .....                                                                 | 4  |
| Figura 3: hipótesis de efecto pistón a escala de punto de extracción. (Butcher, et al., 2005). .....                                                                                   | 5  |
| Figura 4: hipótesis de entrada de barro a escala mina (Butcher, et al., 2005).....                                                                                                     | 6  |
| Figura 5: Relación de fases en una porción de suelos.....                                                                                                                              | 9  |
| Figura 6: Estados de suelos finos no cohesivos y límites de Atterberg, adaptación (Lambe & Whitman, 1979). .....                                                                       | 11 |
| Figura 7: Posibles ordenamientos de partículas esféricas desde estado suelto (a) a compacto (c). Figura de elaboración propia basada en (Lambe & Whitman, 1979) .....                  | 11 |
| Figura 8: Curva de compactación para un ensayo proctor típico. (Lambe & Whitman, 1979).....                                                                                            | 13 |
| Figura 9: Método para obtener de manera simple el ángulo de fricción residual. (Santamarina & Cho, 2001) .....                                                                         | 14 |
| Figura 10: Cono de Abrams. ....                                                                                                                                                        | 17 |
| Figura 11: Diagrama esquemático de un suelo con partículas de sobre tamaño. (Fragaszy, et al., 1992)....                                                                               | 18 |
| Figura 12: Muestreo de mineral en puntos declarados barro, la línea punteada negra representa desde dónde se extraería las muestras en un punto distribuido como el de la figura. .... | 24 |
| Figura 13: Resumen de la planificación de ensayos de compresión no confinada .....                                                                                                     | 30 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1: Envolvente de Mohr (Lambe & Whitman, 1979) .....                                                                              | 14 |
| Gráfico 2: Curvas de distribución granulométrica de muestras de barro obtenidas en laboratorio. ....                                     | 27 |
| Gráfico 3: Curvas de distribución granulométrica para puntos de extracción, estimada a partir de datos de laboratorio y de la mina. .... | 27 |
| Gráfico 4: Compresión no confinada en función de la densidad relativa y humedad. Muestra Muestra 1 Condición húmeda.....                 | 31 |
| Gráfico 5: Compresión no confinada en función de la densidad relativa y humedad Muestra 2 Condición húmeda. ....                         | 31 |
| Gráfico 6: Compresión no confinada en función de la densidad relativa y humedad Muestra 3 Condición húmeda. ....                         | 32 |
| Gráfico 7: Compresión no confinada muestra 1 condición húmeda. ....                                                                      | 33 |
| Gráfico 8: Compresión no confinada muestra 2 condición húmeda. ....                                                                      | 33 |
| Gráfico 9: Compresión no confinada muestra 3 condición húmeda. ....                                                                      | 34 |
| Gráfico 10: Asentamiento muestra 1 condición húmeda.....                                                                                 | 35 |
| Gráfico 11: Asentamiento muestra 2 condición húmeda.....                                                                                 | 35 |
| Gráfico 12: Asentamiento muestra 3 condición húmeda.....                                                                                 | 36 |
| Gráfico 13: resultados consolidación odométrica, muestra 1.....                                                                          | 37 |
| Gráfico 14: Resultados consolidación odométrica, muestra 2.....                                                                          | 37 |
| Gráfico 15: Resultados consolidación odométrica, muestra 3.....                                                                          | 38 |
| Gráfico 17: Carta de plasticidad de finos USCS.....                                                                                      | 40 |
| Gráfico 18: Cohesión Muestra 1.....                                                                                                      | 42 |
| Gráfico 19: Cohesión Muestra 2.....                                                                                                      | 42 |
| Gráfico 20: Cohesión Muestra 3.....                                                                                                      | 43 |
| Gráfico 21: Cohesión en función de la densidad seca para las 3 muestras en condición húmeda.....                                         | 44 |
| Gráfico 22: Comparación de cohesión para condición seca y húmeda.....                                                                    | 44 |
| Gráfico 23: Cohesión en función de humedad para bajas resistencias. ....                                                                 | 45 |
| Gráfico 24: Límites plásticos de cohesión para las 3 muestras.....                                                                       | 46 |
| Gráfico 25: Asentamiento y clasificación Muestra 1.....                                                                                  | 47 |
| Gráfico 26: Asentamiento y clasificación Muestra 2.....                                                                                  | 47 |
| Gráfico 27: Asentamiento y clasificación Muestra 3.....                                                                                  | 48 |
| Gráfico 28: Límite líquido de asentamiento. ....                                                                                         | 49 |
| Gráfico 29: Límite plástico de asentamiento. ....                                                                                        | 49 |
| Gráfico 30: Envolventes Mohr-Coulomb para condición $D_r=60\%$ y $Sat.=60\%$ .....                                                       | 51 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 1: Clasificación de tamaños de partícula USCS (ASTM-D2487, 2000).....                                             | 8  |
| Tabla 2: Compacidades máxima y mínima de suelos granulares (Lambe & Whitman, 1979) .....                                | 12 |
| Tabla 3: Denominación según compacidad relativa o densidad relativa (Lambe & Whitman, 1979) .....                       | 12 |
| Tabla 4: Valores típicos de ángulos de fricción para distintos suelos. (Lambe & Whitman, 1979). .....                   | 14 |
| Tabla 5: Clasificación de consistencia según resistencia no confinada y cohesión (Head, 1994) .....                     | 15 |
| Tabla 6: Valores típicos para coeficiente de consolidación e índice de compresión. (Lambe & Whitman, 1979) .....        | 16 |
| Tabla 7: Clases de agregados según asentamiento en centímetros. Norma europea BS 8500 .....                             | 16 |
| Tabla 8: Índices granulométricos barro IOZ.....                                                                         | 19 |
| Tabla 9: Humedad in-situ de muestras IOZ .....                                                                          | 19 |
| Tabla 10: Gravedad específica de mineral IOZ.....                                                                       | 20 |
| Tabla 11: Límites de Atterberg mineral IOZ. ....                                                                        | 20 |
| Tabla 12: Índices de vacío in-situ y máximo mineral IOZ. ....                                                           | 20 |
| Tabla 13: Ensayos geotécnicos disponibles, Ventajas y Desventajas .....                                                 | 22 |
| Tabla 14: Información de las muestras.....                                                                              | 24 |
| Tabla 15: Parámetros a determinar mediante ensayos de laboratorio junto a los ensayos a realizar.....                   | 25 |
| Tabla 16: Humedad natural de muestras de barro. ....                                                                    | 26 |
| Tabla 17: Límites de Atterberg de las muestras de barro. ....                                                           | 28 |
| Tabla 18: Resultados gravedad específica para muestras.....                                                             | 28 |
| Tabla 19: Densidad máxima y mínima para muestras.....                                                                   | 29 |
| Tabla 20: Densidad máxima Proctor modificado muestras.....                                                              | 29 |
| Tabla 21: Ángulos de fricción .....                                                                                     | 36 |
| Tabla 22: Coeficiente de consolidación para las distintas muestras (Promedio del obtenido para cada fase de carga)..... | 38 |
| Tabla 23: Índice de compresión (Cc) e índice de expansión (Cr) para cada muestra. ....                                  | 38 |
| Tabla 24: Porcentaje representado de cada muestra para cada ensayo. ....                                                | 39 |
| Tabla 25: Porcentajes de muestra según clasificación por tamaño.....                                                    | 39 |
| Tabla 26: Indicadores de distribución granulométrica.....                                                               | 40 |
| Tabla 27: Categorización de muestras según clasificación USCS. ....                                                     | 41 |
| Tabla 28: índice de vacíos máximo y mínimo .....                                                                        | 41 |
| Tabla 29: Relación entre cohesión seca y húmeda .....                                                                   | 45 |
| Tabla 30: Comparación entre límites plásticos y límites plásticos de cohesión. ....                                     | 46 |
| Tabla 31: Comparación límite líquido de asentamiento y límite líquido convencional de Atterberg. ....                   | 49 |
| Tabla 32: Comparación límite plástico de asentamiento y límite plástico convencional de Atterberg.....                  | 50 |
| Tabla 33: Resumen de caracterización geotécnica .....                                                                   | 52 |
| Tabla 34: Comparación de resultados de Diablo Regimiento e IOZ. ....                                                    | 53 |



# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

El fenómeno de bombeo de barro corresponde al ingreso repentino de mineral saturado a labores subterráneas (Butcher, et al., 2005). Puede provocar daños a las personas y equipos, fatalidades, retrasos en la producción, dilución excesiva y cierre de faenas.

El Teniente es la mina subterránea de Cobre más grande del mundo. Se localiza 50 kilómetros al este de la ciudad de Rancagua entre las cotas 2.100 y 2.800 sobre el nivel del mar. El método de explotación es Block/Panel Caving mecanizado con palas LHD a piques de traspaso. Desde 1989 a 2010 se han registrado siete eventos de bombeo de barro en la División El teniente, uno de los cuales implicó una víctima fatal en 2007 (Becerra, 2011). Los puntos de extracción clasificados como peligro crítico se cierran, lo que generalmente implica la pérdida de las reservas aún no extraídas desde aquellos puntos, sólo en Diablo Regimiento la cantidad de puntos cerrados por esta razón es de 112. (González L., 2014)

La minería tipo Block/Panel Caving es inherentemente susceptible a sufrir bombeos de barro, ya que las labores subterráneas están conectadas con la superficie, lo que genera un potencial punto de entrada para agua y barro. Además tiene el potencial de acumular agua, generar finos y producir perturbaciones en puntos de extracción (Jakubec, et al., 2012).

Como método de prevención de este fenómeno, se define una matriz de peligro (Figura 1) para los puntos de extracción en División El teniente que depende de la granulometría y la humedad observada en el punto. La humedad aparece en la matriz como distintos rangos en porcentaje, y la granulometría está referida al porcentaje de tamaños bajo 25 cm observados en el punto de extracción.

| Moisture content | Grain size (G) $\leq$ 25 cm            |                    |                                         |
|------------------|----------------------------------------|--------------------|-----------------------------------------|
|                  | G < 30%<br>(mostly thick granulometry) | 30% $\leq$ G < 70% | G $\geq$ 70% (mostly fine granulometry) |
| <4%              | Normal condition                       | Normal condition   | Normal condition                        |
| 4%-7%            | In observation                         | In observation     | In observation                          |
| 7% - 10%         | In observation                         | In observation     | Critical risk                           |
| $\geq$ 10%       | Critical risk                          | Critical risk      | Critical risk                           |

|                  |
|------------------|
| Normal condition |
| In observation   |
| Critical risk    |

Figura 1: Matriz de peligro de bombeo de barro para puntos de extracción, El Teniente (Becerra, 2011)

peligro Dado el peligro de bombeo en puntos de extracción con mineral fino saturado, se ha utilizado equipos tele comandados para realizar la extracción. Sin embargo, este método tiene un ritmo de producción muy bajo (Codelco DET, 2013), y podría generar un potencial peligro de bombeo de piques al depositar mineral fino saturado en los mismos.

No se han realizado estudios que permitan determinar las causas del mecanismo de los bombeos de barro en El Teniente, por lo que no se ha podido establecer un método que permita estimar la ocurrencia de los mismos. Al no existir estudios de laboratorio del “Barro” de El Teniente, lo que se conoce del mismo desde la perspectiva de materiales es mínimo:

- Corresponde a “finos”, sin embargo, se utiliza el término para referirse a partículas bajo los 5 cm e incluso bajo 25 cm en algunos casos. Esta definición es insuficiente, puesto que la capacidad de fluir del material (como se verá en la revisión bibliográfica) depende de la granulometría del mismo, y el criterio utilizado en este caso es muy amplio.
- Se encuentra húmedo, y la humedad de los puntos de extracción se mide regularmente en la mina. La humedad como variable crítica es utilizada en la matriz de peligro de la Figura 1.
- Al reabrir un punto cerrado por barro, se encuentran dificultades para extraer el mineral desde el punto de extracción, puesto que este se ha secado y endurecido.
- Se identifican 3 colores para el mineral tipo barro: Amarillento, gris y mezcla de ambos, se supone que el color indicaría su grado de oxidación, sin embargo no hay estudios mineralógicos que lo sustenten.

## **1.2 PROBLEMÁTICA**

La utilización de la matriz de la Figura 1 implica la pérdida de reservas planificadas, puesto que provoca que se cierren puntos que aún presentan leyes por sobre la ley de corte y que no han alcanzado las toneladas que se ha planificado extraer. La matriz fue creada a partir de un estudio en Freeport, Indonesia (Call & Nicholas, et al., 1998) y debido a que no se ha realizado estudios geotécnicos al mineral fino saturado (“Barro”) de El Teniente, no es posible asegurar la validez de la Matriz utilizada como criterio. Establecer criterios específicos para El Teniente permitirá aumentar la recuperación de reservas y mejorar las condiciones de seguridad en la operación.

De manera de establecer herramienta preventiva o predictiva se requiere entender el fenómeno físico y las variables que lo afectan. En este contexto es necesario determinar las características del mineral susceptible a este fenómeno además de su comportamiento en relación a las variables que lo afectan.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### *1.3.1 OBJETIVOS GENERALES*

El objetivo general del trabajo de título es caracterizar, en base a ensayos de laboratorio las propiedades índice y comportamiento mecánico del mineral saturado en puntos de extracción de la mina Diablo Regimiento (DR) perteneciente a Codelco, División El Teniente.

#### *1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS*

1. Obtención de parámetros geotécnicos índice del mineral.
2. Caracterización de la resistencia del mineral.

### **1.4 ALCANCES**

El mineral analizado corresponde al obtenido de tres puntos de extracción con presencia de barro en El Teniente (escogidos por personal de la Gerencia de Recursos Mineros y Desarrollo), los puntos escogidos corresponden a distintos tipos de barro que se diferencian de forma visual en los distintos puntos de extracción (Diablo Regimiento, 2013). Se obtienen 300 kilos de mineral de cada punto, con tal de realizar las pruebas. La representatividad del estudio se limita por lo tanto a la elección de los puntos, y de la elección del material extraído de cada punto.

Los ensayos a realizar, dado el tamaño de las partículas del mineral formador de barro, son característicos del estudio de suelos en ingeniería civil, sin embargo sus resultados son de utilidad para caracterizar mineral saturado fino.

### **1.5 CONTENIDOS DE LA MEMORIA**

Los contenidos de la memoria son:

- Revisión bibliográfica: Se presentan las hipótesis existentes acerca de los mecanismos y condiciones que podrían generar un bombeo de barro. Además se presentan los conceptos y parámetros que permiten analizar el problema y finalmente caracterizar a través de estos el mineral involucrado.
- Metodología: Se presentan los pasos a seguir con el fin de cumplir el objetivo de caracterizar el mineral susceptible a bombeos. En este capítulo se presentan los ensayos de laboratorio a realizar y sus limitaciones.
- Resultados: Se presentan los principales resultados obtenidos junto a su interpretación.
- Análisis de resultados: Se analizan los resultados y se relacionan con los objetivos planteados.
- Conclusiones y recomendaciones: Se responde a los objetivos planteados según la problemática planteada inicialmente. Se recomiendan estudios futuros.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MECANISMOS DE BOMBEO DE BARRO

En el capítulo 1.1 se define un bombeo de barro como ingreso repentino de mineral saturado a labores subterráneas (Butcher, et al., 2005). En la bibliografía es posible encontrar hipótesis para el fenómeno físico, junto con las condiciones necesarias para la ocurrencia del fenómeno.

Los elementos necesarios para que se produzca un bombeo de barro (Butcher, et al., 2000) se esquematizan en la Figura 2.

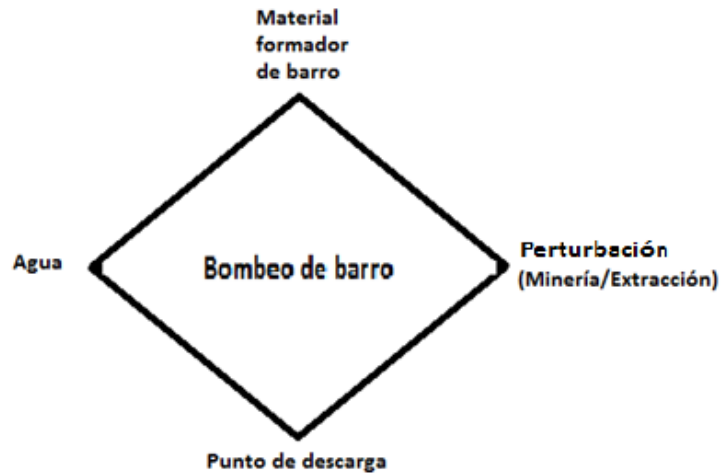


Figura 2: Elementos necesarios para que se produzca bombeo de barro. Figura adaptada de (Butcher, et al., 2000).

El mismo autor plantea dos hipótesis que relacionan las variables de la Figura 2. En particular se plantea hipótesis a escala local de puntos de extracción (Figura 3), y a escala mina (Figura 4) (Butcher, et al., 2005).

- Secuencia de Eventos:**
1. Se produce un arco estable en la columna de extracción.
  2. Se genera un vacío bajo el arco debido a la extracción.
  3. El arco de roca impide el movimiento de la columna.
  4. El arco colapsa debido a la extracción bajo el mismo o en puntos adyacentes.
  5. La columna de extracción compacta el barro y este es descargado.

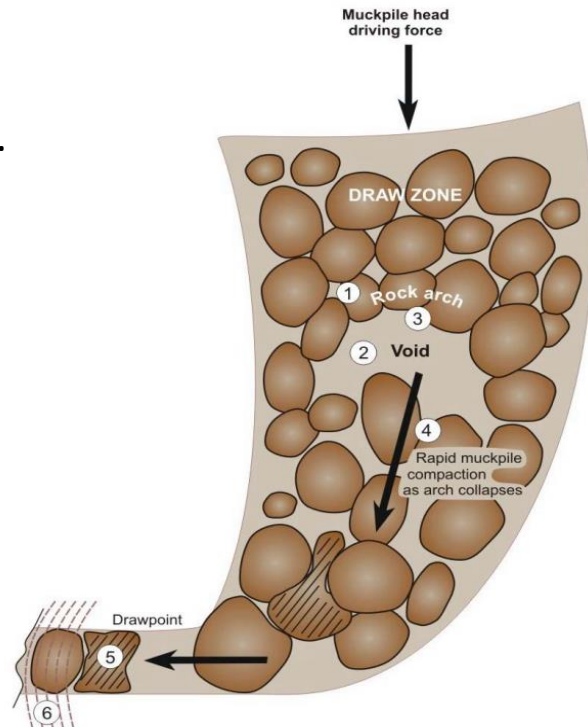


Figura 3: hipótesis de efecto pistón a escala de punto de extracción. (Butcher, et al., 2005).

En la Figura 3 se plantea un mecanismo de bombeo de barro a escala de punto de extracción que consiste en la formación de un arco estable que genera un vacío debido a que la extracción continúa bajo el arco. Además, supone la formación de acumulaciones de “barro” en la columna bajo el vacío. Producto de una perturbación, se genera el colapso del arco, lo que genera una compresión en el vacío y la columna bajo el mismo, esto compacta el barro acumulado y este fluye hacia a través del punto de extracción hacia las labores subterráneas.

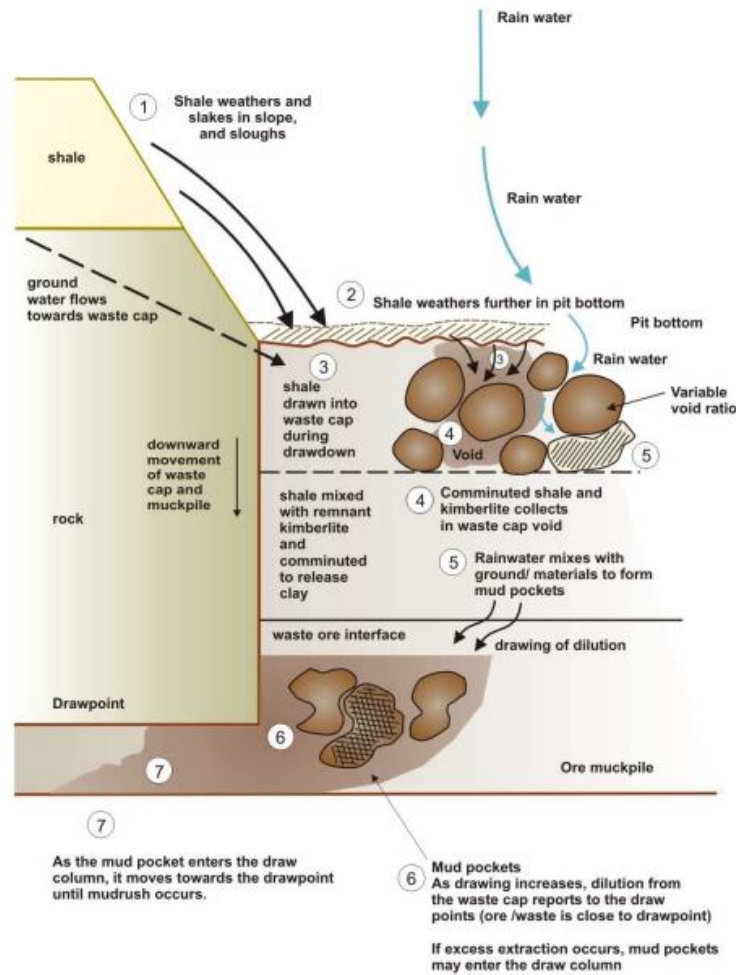


Figura 4: hipótesis de entrada de barro a escala mina (Butcher, et al., 2005).

En la Figura 4 se muestra una hipótesis a escala mina de mecanismos de entrada de barro a labores subterráneas. Se plantea una situación en la que un punto de extracción se encuentra bajo una capa de material quebrado en contacto con la superficie (análogo a la situación de la minería Block/Panel Caving). La entrada de agua es, según esta hipótesis, directamente a través del material quebrado y producto de precipitaciones. El material fino tiene dos orígenes: directamente desde el suelo de superficie que se desplaza hacia el material quebrado, y finos por efecto de la conminución generada por el movimiento y rozamiento de material quebrado. Esta entrada de agua, más la entrada y generación de finos, contribuye a la formación de barro que podría generar bombeos.

Jakubec, et al. (2012) ha profundizado más recientemente en las causas de los bombeos de barro desde el punto de vista del comportamiento del mineral tipo barro. Se definen a partir de su comportamiento, dos tipos de barros:

- Barro fluido: Aquel con alto contenido de agua (sobre 50%) y que puede fluir de forma horizontal por más de 500 metros. Este tipo de barro fluye como una pulpa, y es tratado más como un problema de descarga de agua más que un bombeo de barro.

- Barro viscoso: tiene un contenido de agua de 17 a 23%. No fluye de forma natural, sin embargo, si se somete a esfuerzos y bajo ciertas condiciones también puede fluir fuera de puntos de extracción. Es este tipo de barro el que puede generar mayor nivel de destrucción, ya que bloquea los desarrollos pudiendo dejar enterrados equipos y/o personas.

Desde el punto de vista de la estabilidad y sollicitaciones locales, se plantea el bombeo de barro como un problema de inestabilidad de materiales (Jakubec, et al., 2012) (Call & Nicholas, et al., 1998); la contracción y consolidación resulta en aumentos en la presión de poros, lo que afecta el comportamiento mecánico del material. Estos autores indican los tipos de mecanismos que podrían generar un comportamiento fluido del material:

- Mecanismos estáticos: Referidos extracción de barro, aumentos en la presión de poros, aumento súbito de esfuerzos por colapso de arcos o paredes de bateas.
- Mecanismos dinámicos: Referidos a vibraciones inducidas por tronaduras, o movimiento de equipos que generan licuefacción o falla de flujo.
- Agua como fuerza movilizadora: El aumento en el contenido de agua puede cambiar las propiedades del barro haciéndolo más fluido o simplemente arrastrándolo por exceso de presión.

Los mismos autores hacen énfasis en la extracción irregular que podría realizarse en minería de block/panel caving: Si se excede la extracción en ciertas áreas en particular de la mina, se propicia la formación de zonas de bajos esfuerzos, gran cantidad de vacíos en torno a ciertos puntos de extracción, permitiendo la entrada de finos y agua. Luego, si las condiciones de esfuerzos cambian en dicha zona, los finos con alta humedad podrían someterse a mayores esfuerzos. Los finos además pueden tener baja permeabilidad, por lo que ante un aumento de esfuerzos puede generarse también un aumento en la presión de poros, suficiente como para generar licuación del mineral que podría fluir a través de puntos de extracción.

También existe bibliografía relacionada al relleno de caserones, especialmente en el caso de relleno con relaves. Estos estudios son relevantes debido a que los relaves contienen minerales en tamaño fino y con alto contenido de humedad (A. Henderson, 2005). La evaluación geotécnica de caserones rellenos, desde el punto de vista de la estabilidad del relleno dentro del caserón, es análoga a la problemática analizada; se tiene construcciones en roca (batea, caserón) rellenas de material fino con alta humedad. Las diferencias son:

- Los relaves contienen sólo material fino generalmente bajo los 200 micrones, en cambio el barro en puntos de extracción en Block/Panel Caving puede también contener colpas o bloques de gran tamaño en conjunto finos.
- En el caso de relleno de caserones, no existe la gran sobre carga que existe en la minería tipo block/panel caving, donde hay una columna de mineral fracturado desde el punto de extracción a la superficie.

- El punto de extracción de los caserones se sella permanentemente para evitar la salida del relave, en el caso de bombeos, el punto de extracción se encuentra bajo extracción, y es el mismo material el que bloquea la salida del mismo sin un sello adicional.

El análisis de estabilidad en el caso de caserones rellenos de relave, es un balance estático de fuerzas que permite calcular cuánto debe resistir la compuerta o losa que se utilice para sellar el punto de extracción.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

Se ha planteado que el material susceptible a estallidos de barro tiene un alto contenido de finos bajo 2 mm (Call & Nicholas, et al., 1998). Por esta razón, es fundamental conocer las propiedades de los suelos para entender la interacción de variables involucradas en el sistema.

### 2.2.1 DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS

El concepto “finos” puede ser subjetivo, en minería muchas veces se define el concepto de forma que tiene sentido en la operación. En algunos casos se habla incluso de finos como los fragmentos menores a 25 centímetros.

En este trabajo el concepto fino se utiliza para referirse a partículas menores a 2mm, es decir arenas, limos y arcillas. En la Tabla 1 se presenta la clasificación de suelos según su tamaño en milímetros según USCS (“Unified Soil Classification System”).

Tabla 1: Clasificación de tamaños de partícula USCS (ASTM-D2487, 2000)

| Denominación          |        | Rango de tamaño [mm] |       |
|-----------------------|--------|----------------------|-------|
| <b>Bolos</b>          |        | 75                   | 300   |
| <b>Grava</b>          | Gruesa | 19                   | 75    |
|                       | Fina   | 4,75                 | 19    |
| <b>Arena</b>          | Gruesa | 2                    | 4,75  |
|                       | Media  | 0,425                | 2     |
|                       | Fina   | 0,075                | 0,425 |
| <b>Limo y arcilla</b> |        | 0                    | 0,075 |

### 2.2.2 SISTEMA TRIFÁSICO

Los suelos pueden ser representados como un sistema de al menos tres fases: sólido, líquido y gaseoso (Lambe & Whitman, 1979). La Figura 5 presenta estas tres fases, la imagen a la izquierda representa un suelo en estado natural y la de la derecha es un esquema que representa las relaciones de volumen y peso para las distintas fases.



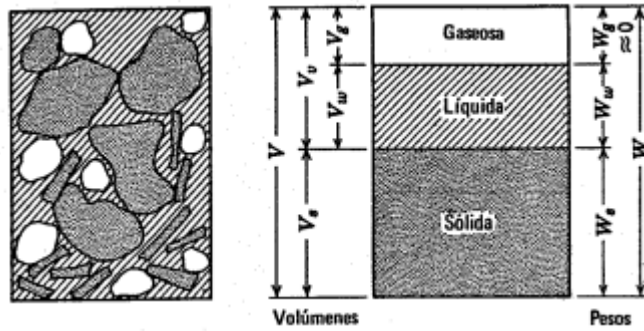


Figura 5: Relación de fases en una porción de suelos.

A partir de las relaciones entre las fases de un suelo se definen las siguientes propiedades:

- a. Porosidad ( $n$ ): razón entre el volumen de vacíos y el volumen total.

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{\text{Volumen de Vacíos}}{\text{Volumen Total}} \quad (1)$$

- b. Índice de vacíos ( $e$ ): razón entre volumen de vacíos y volumen de sólido.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\text{Volumen de Vacíos}}{\text{Volumen de Sólidos}} \quad (2)$$

- c. Grado de saturación ( $S$ ): Porcentaje de vacíos llenos de fluido (agua).

$$S = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\text{Volumen de Agua}}{\text{Volumen de Vacíos}} \quad (3)$$

- d. Contenido de agua ( $w$ ): razón entre peso de agua y el peso de sólido en un suelo.

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{\text{Peso de Agua}}{\text{Peso de Sólidos}} \quad (4)$$

- e. Pesos unitarios

- Total

$$\gamma_t = \frac{W}{V} = \frac{G_s + S * e}{1 + e} \gamma_w = \frac{1 + w}{1 + e} G * \gamma_w \quad (5)$$

- Sólido

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (6)$$

- Agua

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \quad (7)$$

- Seco

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{G_s}{1+e} \gamma_w = \frac{G_s * \gamma_w}{1+w * G_s/S} = \frac{\gamma_t}{1+w} \quad (8)$$

- Sumergido

$$\gamma_b = \gamma_t - \gamma_w = \frac{G_s - 1 - e * (1 - S)}{1 + e} \gamma_w \quad (9)$$

Notar que el peso unitario es la densidad por la aceleración de gravedad, por lo tanto se encuentra en unidades de fuerza/volumen.

f. Gravedad específica (adimensional)

- Masa

$$G_m = \frac{\gamma_t}{\gamma_0} \quad (10)$$

- Agua

$$G_w = \frac{\gamma_w}{\gamma_0} \quad (11)$$

- Sólidos

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_0} \quad (12)$$

$$\gamma_0 = \text{Peso unitario del agua a } 4^\circ\text{C} \approx \gamma_w$$

g. Relaciones importantes:

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (13)$$

$$G_s * w = S * e \quad (14)$$

### 2.2.3 LÍMITES DE ATTERBERG

A partir del trabajo de Atterberg & Casagrande (1948), se definen límites basados en la suposición de que suelos cohesivos finos pueden existir en cuatro estados dependiendo de su contenido de agua o humedad: Sólido, semisólido, plástico y líquido. Los valores de humedad que separan estos estados se conocen como los límites de Atterberg: límite de contracción ( $w_s$ ), límite plástico ( $w_p$  o LP), límite líquido ( $w_l$  o LL). En la Figura 6 se esquematizan los estados y límites.

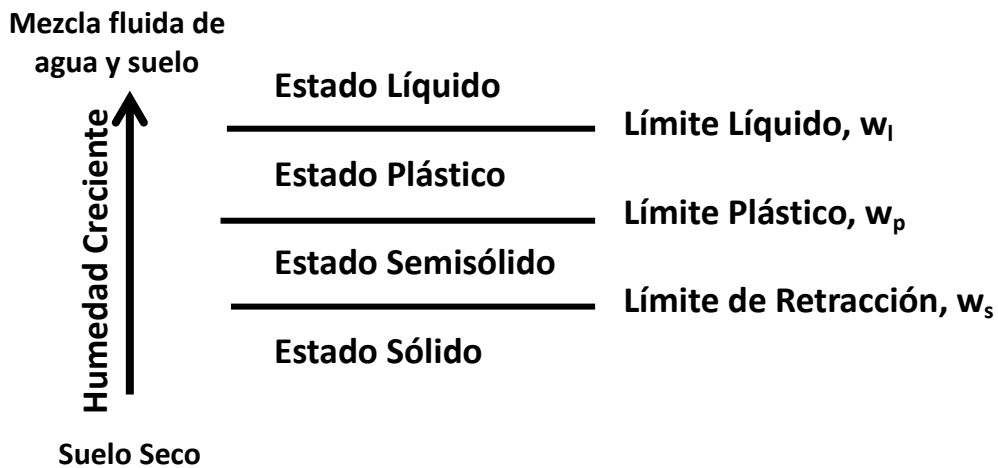


Figura 6: Estados de suelos finos no cohesivos y límites de Atterberg, adaptación (Lambe & Whitman, 1979).

Los cuatro estados señalados corresponden al comportamiento físico del suelo determinado mediante una metodología específica, por lo mismo, los límites corresponden a valores arbitrarios y el uso de estos límites es referencial. No se recomienda el uso de estos parámetros como límites exactos para el diseño ingenieril.

### 2.2.4 ORDENAMIENTO DE PARTÍCULAS (COMPACTACIÓN)

Los conjuntos de partículas pueden disponerse de muchas formas distintas como lo muestra la Figura 7, lo cual varía su índice de vacíos.

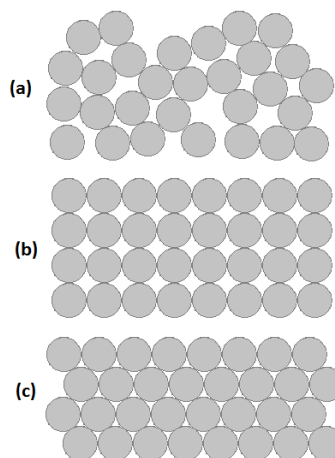


Figura 7: Posibles ordenamientos de partículas esféricas desde estado suelto (a) a compacto (c). Figura de elaboración propia basada en (Lambe & Whitman, 1979)

Se define el estado más compacto (Figura 7, c) en términos de índice de vacíos como  $e_{\min}$  (Correspondiendo a la densidad máxima) y el estado más suelto como  $e_{\max}$  (correspondiendo a densidad mínima).

Tabla 2: Compacidades máxima y mínima de suelos granulares (Lambe & Whitman, 1979)

| Descripción                 | Relación de Vacíos |            |
|-----------------------------|--------------------|------------|
|                             | $e_{\max}$         | $e_{\min}$ |
| Esferas uniformes           | 0,92               | 0,35       |
| Arena de Ottawa normalizada | 0,8                | 0,5        |
| Arena limpia uniforme       | 1                  | 0,4        |
| Limo Inorgánico             | 1,1                | 0,4        |
| Arena limosa                | 0,9                | 0,3        |
| Arena fina a gruesa         | 0,95               | 0,2        |
| Arena micácea               | 1,2                | 0,4        |
| Arena limosa y grava        | 0,85               | 0,14       |

En la Tabla 2 se muestran rangos posibles para índice de vacío para distintos tipos de suelos granulares. Adicionalmente, se define la densidad relativa de un suelo a partir de sus índices de vacío máximo, mínimo (Lambe & Whitman, 1979).

$$D_r = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} * 100\% \quad (15)$$

La densidad relativa se utiliza para evaluar la compactación de un suelo en función de sus propiedades. Adicionalmente, permite comparar de manera normalizada dos suelos distintos, con diferentes índices de vacío máximos y mínimos. En la Tabla 3 se clasifica la compactación de un suelo en función de su densidad relativa.

Tabla 3: Denominación según compactación relativa o densidad relativa (Lambe & Whitman, 1979)

| Compacidad Relativa [%] | Denominación |
|-------------------------|--------------|
| 0 – 15                  | Muy suelta   |
| 15 – 35                 | Suelta       |
| 35 – 65                 | Media        |
| 65 – 85                 | Compacta     |
| 85 - 100                | Muy compacta |

El máximo estado de compactación (máxima densidad) al que puede llegar a estar un suelo bajo un cierto nivel de energía de compactación, depende también del contenido de humedad en el mismo. A medida que aumenta la humedad la densidad máxima obtenida aumenta progresivamente hasta llegar a un máximo desde el cual comienza a disminuir, como se muestra en la Figura 8.

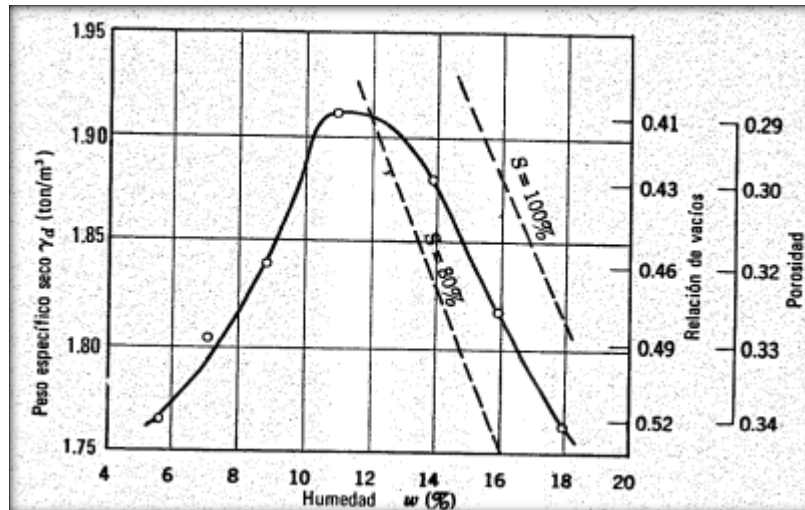


Figura 8: Curva de compactación para un ensayo proctor típico. (Lambe & Whitman, 1979)

La existencia de la humedad óptima para el grado máximo de compactación, se debe a que para humedades bajas se desarrollan fuerzas capilares que se oponen a la reorganización de las partículas, mientras que, cuando la humedad está por sobre el óptimo, se comienzan a llenar los vacíos de agua, lo que impide que la estructura siga disminuyendo su volumen. La implicancia de la humedad óptima es que se ha demostrado que en el caso de evaluar la resistencia de un suelo a la misma densidad, pero compactados uno en el lado seco del óptimo y el otro en el lado húmedo del óptimo, se obtiene que el compactado en el lado seco tiene una mayor resistencia (Seed & Chan, 1959), además la densidad máxima es alcanzada sólo a dicha humedad.

## 2.3 COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE SUELOS

### 2.3.1 TEORÍA DE FALLA DE MOHR-COULOMB

La resistencia de un suelo se puede definir en función de las condiciones de falla del mismo. La falla se define como la condición en la cual el suelo no puede soportar un aumento en el esfuerzo solicitante. Por lo general corresponde al esfuerzo máximo en la curva esfuerzo deformación. En suelos muy plásticos, en los que el suelo no alcanza un punto máximo bien definido, se asume falla en el 20% de deformación axial.

Se puede obtener la resistencia al corte en función de distintos estados de esfuerzo total, lo cual permite definir una curva en el plano de esfuerzo de corte y esfuerzo normal al plano de falla.

El Gráfico 1 muestra la envolvente de Mohr o envolvente de falla. Cada círculo representa un estado de esfuerzo total, y los puntos de intersección de los círculos con la envolvente representan la condición en que la muestra falla. Se necesitan dos puntos, para definir la envolvente mediante ensayos triaxiales, un ensayo por cada punto, sin embargo en general se utiliza al menos tres ensayos para definir la envolvente.

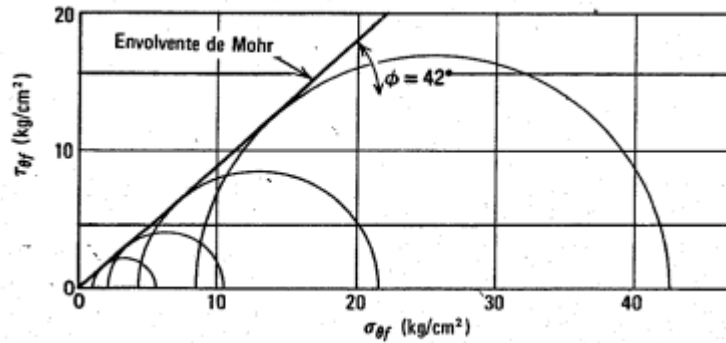


Gráfico 1: Envolvente de Mohr (Lambe & Whitman, 1979)

La envolvente de falla o criterio de falla Mohr-Coulomb se modela como una recta de ecuación.

$$\tau = c + \sigma_n * \tan(\phi) \quad (16)$$

$\tau$ : Esfuerzo cortante

$\sigma_n$ : Esfuerzo normal al plano de falla

$c$ : Cohesión

$\phi$ : Ángulo de fricción interna

Los parámetros de cohesión y ángulo de fricción son los parámetros característicos del material que permiten construir la curva, la cohesión se debe a fuerzas internas que mantienen unidas las partículas de la masa de suelo, y el ángulo de fricción se debe al contacto y roce entre las partículas cuando se someten a esfuerzos normales. Ambos parámetros se pueden obtener luego de definida la curva con ensayos triaxiales (método más preciso) o bien encontrando el valor de cohesión con ensayos de compresión no confinada (utilizando ecuación (17) y el ángulo de fricción residual del método del ángulo de reposo sumergido como en (Santamarina & Cho, 2001). En la Tabla 4 se muestra valores típicos para ángulos de fricción según tipo de suelo. En la Tabla 5 se presenta la clasificación de la consistencia según valores obtenidos en compresión no confinada.

$$c = \frac{\Delta\sigma_f}{2} \quad (17)$$

$\sigma_f =$  Resistencia no confinada

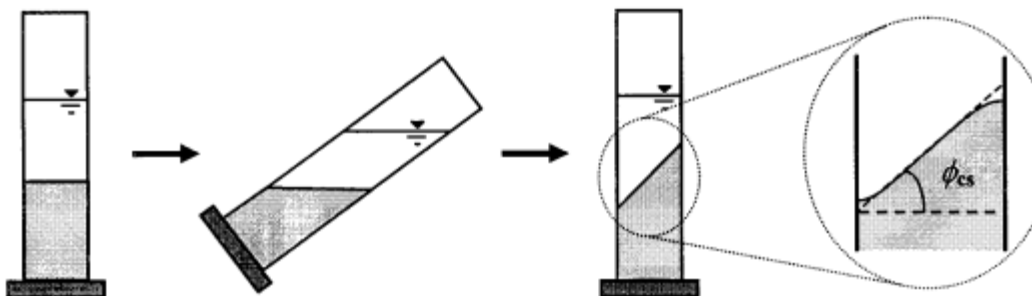


Figura 9: Método para obtener de manera simple el ángulo de fricción residual. (Santamarina & Cho, 2001)

Tabla 4: Valores típicos de ángulos de fricción para distintos suelos. (Lambe & Whitman, 1979).

| Clasificación                      | Ángulos de fricción          |                            |                |
|------------------------------------|------------------------------|----------------------------|----------------|
|                                    | Para la resistencia residual | Para la resistencia máxima |                |
|                                    | $\phi^{\circ}_{cv}$          | Compacidad media           | Compacta       |
|                                    |                              | $\phi^{\circ}$             | $\phi^{\circ}$ |
| <b>Limo (no plástico)</b>          | 26 a 30                      | 28 a 32                    | 20 a 34        |
| <b>Arena uniforme fina a media</b> | 26 a 30                      | 30 a 34                    | 32 a 36        |
| <b>Arena bien graduada</b>         | 30 a 34                      | 34 a 40                    | 38 a 46        |
| <b>Arena y grava</b>               | 32 a 36                      | 36 a 42                    | 40 a 48        |

Tabla 5: Clasificación de consistencia según resistencia no confinada y cohesión (Head, 1994)

| Consistencia             | Resistencia no Confinada [kPa] | Cohesión [kPa] |
|--------------------------|--------------------------------|----------------|
| <b>Muy Blanda</b>        | <20                            | <10            |
| <b>Blanda</b>            | 20 – 40                        | 10 – 20        |
| <b>Blanda a Firme</b>    | 40 – 50                        | 20 – 25        |
| <b>Firme</b>             | 50 – 75                        | 25 – 37,5      |
| <b>Firme a Rígida</b>    | 75 – 100                       | 37,5 – 50      |
| <b>Rígida</b>            | 100 – 150                      | 50 – 75        |
| <b>Muy Rígida o Dura</b> | >150                           | >75            |

### 2.3.2 CONSOLIDACIÓN

La consolidación es un proceso en el cual un suelo saturado es sometido a esfuerzo dejando salir el agua desde su interior con una presión superior a la hidrostática. La salida de agua provoca una disminución en el volumen de la masa de suelo.

Para suelos saturados, la aplicación de esfuerzos afecta la presión del agua que se encuentra entre las partículas de suelo, llamada presión intersticial. Si la presión intersticial es mayor a la hidrostática, el agua tiende a salir de la estructura del suelo.

Se define como consolidación primaria al fin del traspaso del incremento de carga a presión intersticial, es decir, la presión intersticial se iguala a la hidrostática y se detiene la salida de agua desde la masa de suelo.

Este proceso puede ser simulado en laboratorio utilizando un oedómetro o bien una cámara triaxial. Los resultados permiten conocer la relación entre cambio volumétrico y esfuerzo total efectivo. Esto se cuantifica mediante el índice de compresión e índice de expansión, ambos adimensionales. El índice de compresión corresponde al proceso de carga y el de expansión al de descarga en consolidación. A mayor índice, los cambios volumétricos son más sensibles a cambios en el esfuerzo total efectivo.

$$C = - \frac{\Delta e}{\Delta \text{Log}(\sigma/\sigma_u)} \quad (18)$$

*C*: Índice de compresión o expansión según sea el caso

$\sigma$ : Esfuerzo total efectivo

*e*: índice de vacíos

$\sigma_u$ : Esfuerzo unitario (Valor = 1)

Además la consolidación permite conocer la relación entre tiempo y deformaciones. Esta se cuantifica mediante el coeficiente de consolidación, que en principio es constante para cada fase

de consolidación y por lo tanto característicos de cada suelo. En un ensayo odométrico, este coeficiente se obtiene para cada fase de carga.

En la Tabla 6 se presenta los rangos de valores típicos para índice de compresión y coeficiente de consolidación para distintos tipos de suelo.

**Tabla 6: Valores típicos para coeficiente de consolidación e índice de compresión. (Lambe & Whitman, 1979)**

| Tipo de Suelo    |                   | Índice de plasticidad | Coeficiente de consolidación $C_v$ [ $m^2/año$ ] |                                                      | Índice de compresión $C_c$  |
|------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------|
|                  |                   |                       | No perturbado                                    | Remoldado                                            |                             |
| Arcilla          | Montmorillonita   | Sobre 25              | 0,1 – 1                                          | Alrededor de 25% a 50% de los valores no perturbados | Hasta 2,6 (Montmorillonita) |
|                  | Alta plasticidad  |                       |                                                  |                                                      |                             |
|                  | Plasticidad media | 25 -5                 | 1 - 10                                           |                                                      | 0,8 – 0,2                   |
| Baja plasticidad | 15 o menos        | 10 – 100              |                                                  |                                                      |                             |
| Limo             |                   |                       | Sobre 100                                        |                                                      |                             |

### 2.3.3 ASENTAMIENTO Y EXTENSIÓN DE FLUJO

Para realizar estimaciones de fluidez de forma cualitativa en pastas y agregados cohesivos húmedos existe una herramienta utilizada generalmente en aglomerados de tipo hormigón. Esta consiste en el llenado de un molde cónico con el agregado. Luego del llenado el molde se retira y se mide la altura que alcanza el cono con respecto a la original (asentamiento), el diámetro que alcanza su base respecto al inicial, y el tiempo que demora en alcanzar cierto diámetro (extensión de flujo, Norma japonesa JSCE-F503)

**Tabla 7: Clases de agregados según asentamiento en centímetros. Norma europea BS 8500**

| Clase                    | Rango asentamiento [cm] |
|--------------------------|-------------------------|
| <b>Seco</b>              | 0 – 4,5                 |
| <b>Plástico</b>          | 4,5 – 9,5               |
| <b>Blando</b>            | 9,5 – 15,5              |
| <b>Superfluidificado</b> | >15,5                   |





**Figura 10: Cono de Abrams.**

En la Figura 10 se muestra un Cono de Abrams. Sus diámetros inferior y superior son de 20 y 10 cm respectivamente, y su altura es de 30 cm.

#### **2.4 AGREGADOS GRANULARES CON SOBRE TAMAÑOS**

Los materiales granulares (suelos) que contienen partículas de tamaños grava a bolo presentan un desafío para su caracterización geotécnica, puesto que dichos tamaños no pueden ser incluidos en ensayos geotécnicos convencionales. A continuación se describe un método para evaluar suelos con presencia de sobre tamaños, este método se conoce como “modelo de la matriz” (Fragaszy, et al., 1992).

El modelo de la matriz considera como “sobre tamaño” a las partículas demasiado grandes para ser incluidas en un test en particular, no se refiere a ningún tamaño en particular. En este modelo, se considera que el suelo se divide en dos partes, los sobre tamaños y la matriz (aquellas partículas suficientemente pequeñas para ser parte del ensayo). La Figura 11 muestra que el suelo está compuesto por matriz y sobre tamaño, en la misma figura se distinguen las partículas de matriz en el campo cercano a los sobre tamaños y otra en el campo lejano a estas.

Se distingue dos casos para la relación entre matriz y sobre tamaños:

- Caso flotante (Figura 11a): Partículas de sobre tamaño representan un bajo porcentaje (Alrededor de 35% o menos del suelo en estudio en masa), y hay pocos o nulos contactos entre ellas. Caso no flotante (Figura 11b): Partículas sobre tamaño representan un gran porcentaje del total de suelo estudiado (65% o más en masa), en donde las partículas de sobre tamaño están en contacto entre ellas. En este caso la matriz es solo un relleno para los vacíos generados entre los contactos de las partículas de sobre tamaño.

Además, se hace distinción entre matriz cercana o en contacto a las partículas sobre tamaño (Campo cercano) y matriz lejana a las partículas con sobre tamaño (Campo lejano). Esta distinción también se define en la Figura 11.

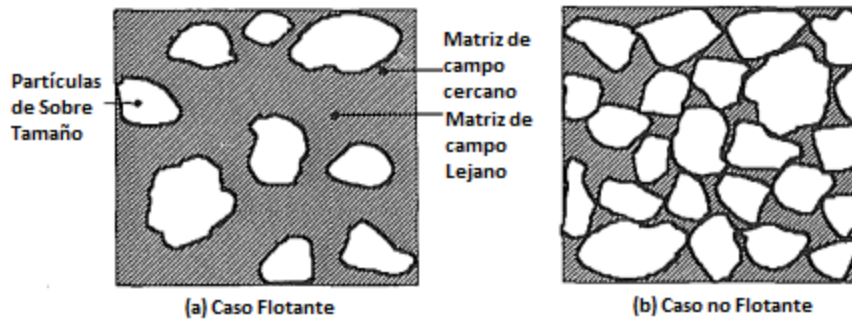


Figura 11: Diagrama esquemático de un suelo con partículas de sobre tamaño. (Fragaszy, et al., 1992)

Se ha demostrado que el modelo de la matriz es válido para predecir el comportamiento esfuerzo-deformación de un agregado con sobre tamaños, mediante la caracterización en laboratorio de la matriz siempre y cuando la relación entre matriz y sobre tamaños se encuentre en un caso flotante (Fragaszy, et al., 1992).

Para la utilización de este modelo es necesario precisar que los resultados de la caracterización de la matriz representan el comportamiento a una densidad relativa en particular, por lo tanto es necesario precisar la densidad relativa a la que se encuentra la matriz de campo lejano para el suelo total con sobre tamaños.

Cuando se agregan grandes partículas a una matriz de un suelo más fino, el volumen final inducido es mayor que la suma de los volúmenes iniciales de matriz y partículas grandes debido al efecto de las superficies (Fragaszy, et al., 1990). En el campo cercano, las partículas de matriz se ubican sobre la superficie de sobre tamaños generando vacíos que no existirían si sólo hubiera matriz. Para esto se ha definido un método de evaluación de densidad de la matriz de campo lejano en un suelo con sobre tamaño (Fragaszy, et al., 1990) que no se aborda en esta memoria.

## 2.5 CASO DE ESTUDIO IOZ, FREEPORT (1998)

Como se ha mencionado anteriormente, existe un estudio geotécnico relacionado al mineral saturado clasificado como barro en la mina IOZ, Freeport (Call & Nicholas, et al., 1998). IOZ utilizó el método de Block Caving, tuvo una altura de columna de 152 metros y se encontraba bajo la mina GBT (Gunung Bijih Timur) conectada a superficie que cesó sus operaciones en 1993. El estudio surge como respuesta a un accidente fatal ocurrido en 1996 en IOZ consecuencia directa de un caso de bombeo de barro, en aquel entonces era el tercer accidente relacionado a bombeos de barro en la mina.

El estudio se divide en varias secciones, a continuación se presentan la metodología y resultados de las secciones pertinentes al trabajo de esta memoria.

### 2.5.1 PROPIEDADES GEOTÉCNICAS

Se realiza ensayos de laboratorio a seis muestras provenientes de barro en distintos puntos de IOZ. Los ensayos triaxiales se realizan para una mezcla de dos de las muestras.

- Distribución Granulométrica: Las muestras tienen similar distribución, en general bien graduadas y encontrándose alrededor de un 85% de las muestras bajo los 150 mm, y alrededor de un 4% bajo los 75 micrones.

**Tabla 8: Índices granulométricos barro IOZ.**

|                 | <b>P6/5W</b> | <b>P3/5E</b> | <b>P3/3E</b> | <b>P3/1W</b> | <b>P1/2E</b> | <b>P1/4E</b> |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>D60 [mm]</b> | 22,24        | 29,87        | 14,32        | 11,11        | 4,22         | 24,61        |
| <b>D30 [mm]</b> | 3,62         | 1,73         | 0,99         | 1,06         | 0,58         | 5,14         |
| <b>D10 [mm]</b> | 0,35         | 0,20         | 0,11         | 0,21         | 0,14         | 0,33         |
| <b>Cc</b>       | 62,97        | 152,06       | 129,64       | 52,62        | 29,97        | 74,78        |
| <b>Cu</b>       | 1,67         | 0,51         | 0,62         | 0,48         | 0,57         | 3,26         |

- Contenido de humedad

**Tabla 9: Humedad in-situ de muestras IOZ**

|                    | <b>P6/5W</b> | <b>P3/5E</b> | <b>P3/3E</b> | <b>P3/1W</b> | <b>P1/2E</b> | <b>P1/4E</b> |
|--------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Humedad [%]</b> | 10,9         | 10,9         | 11,7         | 12,5         | 13,3         | 11,5         |

- Gravedad específica

**Tabla 10: Gravedad específica de mineral IOZ**

|    | P6/5W | P3/5E | P3/3E | P3/1W | P1/2E | P1/4E |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Gs | 3,46  | 3     | 2,87  | 2,89  | 2,98  | 3     |

- Límites de Atterberg

**Tabla 11: Límites de Atterberg mineral IOZ.**

|                        | P6/5W | P3/5E | P3/3E | P3/1W | P1/2E | P1/4E |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Límite líquido</b>  | 22,7  | 19,2  | 18,8  | 19,9  | #N/A  | 19,3  |
| <b>Límite plástico</b> | 12,7  | 16,7  | 16,4  | 15,9  | #N/A  | 14,7  |

- Índice de vacíos

Notar que el índice de vacíos in-situ, es obtenido de la pila de mineral en el punto de extracción. No se conoce el índice de vacíos dentro de la batea.

**Tabla 12: Índices de vacío in-situ y máximo mineral IOZ.**

|                                | P6/5W | P3/5E | P3/3E | P3/1W | P1/2E | P1/4E |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Índice de vacío in-situ</b> | 0,59  | 0,33  | 0,34  | 0,38  | 0,4   | 0,34  |
| <b>Índice de vacíos máximo</b> | 0,47  | 0,24  | 0,28  | 0,31  | 0,31  | 0,28  |

- Ensayos Triaxiales CIU

Los ensayos fueron realizados al mineral bajo 20mm de tamaño, en probetas de 101mm de diámetro. El material ensayado es un compuesto de 2 muestras (P3/DP3E y P3/DP3W) obtenidas de terreno. No se detallan estos resultados, debido a que no son aplicados a este trabajo.

### 2.5.2 CONCLUSIONES: CONDICIONES PARA FLUIR

- Partículas menores a 2mm deben ser superiores al 20%. Esta conclusión se obtiene a partir del análisis del mineral que ya ha presentado falla fluida en IOZ. Para realizar una recomendación, de las curvas granulométricas, se tiene que para que exista un 20% de arenas, debe haber sobre un 75% bajo 50mm.
- Saturación sobre 80%. Esta conclusión se obtiene de la revisión bibliográfica del informe, no es obtenida directamente de los resultados. La saturación al 80% en el índice de vacíos in-situ, implica humedades sobre 8,8%. La recomendación de este informe es tener en consideración humedades sobre 8,5%.

Notar que el índice de vacíos in-situ puede no corresponder al del mineral dentro de la batea, puesto que ha sido obtenido en la pila del punto de extracción.

- De las consolidaciones triaxiales, se obtiene que las condiciones finales indican densidad relativa alrededor del 90%, por lo que para que ocurra cambio volumétrico contractivo que permita la falla fluida, la condición inicial debe ser más suelta, es decir, menor a 90% de densidad relativa, lo cual es un hecho en las muestras analizadas, y no se hacen recomendaciones al respecto.

Notar que la densidad relativa se calcula en este informe sin utilizar la densidad mínima, es decir 0% corresponde a densidad cero, y 100% corresponde a la densidad máxima, por lo que no corresponde a la densidad relativa que se analiza en esta memoria.

## **2.6 CONCLUSIONES DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Desde un punto de vista geotécnico, existen dos mecanismos que podrían generar un comportamiento fluido del mineral y por tanto un bombeo de barro:

- Falla fluida (Licuación verdadera)
- Exceso de humedad

Se descartan en principio mecanismos dinámicos (tronaduras y vibraciones), ya que según registros de eventos de bombeo y deslizamientos de mineral clasificado como barro (Codelco DET, 2013), se ha concluido que estos ocurren siempre corto tiempo después de realizar extracción en el punto, por lo que se infiere que es lo que gatilla los eventos. El único evento de bombeo relacionado a sismicidad, ocurre tres días después de ocurrido el terremoto del 27 de febrero de 2010. Sin embargo, la licuación por vibraciones ocurre durante el evento sísmico, y no desfasada en el tiempo, por lo que se asume que el bombeo ocurre por causas distintas al terremoto.

Se han planteado todos los conceptos geotécnicos que permitirían evaluar estas condiciones, a continuación se resume cada parámetro del material que se debe obtener para la evaluación del mismo según los mecanismos planteados (Tabla 13).

**Tabla 13: Ensayos geotécnicos disponibles, Ventajas y Desventajas**

| Propiedad o Característica               | Objetivos                                                      | Obtención en laboratorio           | Características ensayo                |                                                |
|------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|
|                                          |                                                                |                                    | Ventaja                               | Desventaja                                     |
| <b>Granulometría</b>                     | Caracterización de material                                    | Tamizaje (ASTM)                    | Simple, barato                        | Sobre 75 micrones                              |
|                                          | Definición de ensayos                                          | Hidrometría (ASTM)                 | Bajo 75 micrones                      | Indirecto                                      |
|                                          |                                                                | Difracción de rayos                | Bajo 75 micrones                      | Alto costo                                     |
| <b>Límites de Atterberg</b>              | Estado del material según humedad                              | Método (ASTM)                      | Simple, bajo costo                    | Sólo bajo 0,425 milímetros                     |
|                                          | Caracterización de porción fina                                |                                    |                                       |                                                |
| <b>Gravedad Específica</b>               | Junto a compactación, rango de índice de vacíos posible        | Picnómetro (ASTM)                  | Simple, bajo costo                    | Bajo 4,75 mm                                   |
|                                          |                                                                | Masa sumergida (ASTM)              | Simple, bajo costo                    | Sobre 4,75 mm                                  |
| <b>Compactación máxima y mínima</b>      | Rango de densidades posibles del material                      | Densidad mínima (ASTM)             | Simple, bajo costo                    | Suelo seco, bajo 475 mm                        |
|                                          | Junto a gravedad específica, rango de índice de vacíos posible | Densidad máxima (JSSFME)           | Simple, bajo costo                    | Suelos con pocos finos, bajo 4,75 mm           |
|                                          |                                                                | Proctor Modificado (ASTM)          | Simple, bajo costo                    | Bajo 3/4 de pulgada                            |
| <b>Consolidación</b>                     | Curva en el plano e-p del material                             | Odómetro (ASTM)                    | Simple                                | Larga duración, bajo 0,425 mm, paredes rígidas |
|                                          |                                                                | Triaxial (ASTM)                    | Exacto                                | Caro, complejo, bajo 4,75mm                    |
| <b>Cohesión</b>                          | Parámetro c del modelo de falla Mohr-Coulomb                   | Compresión no Confinada (ASTM)     | Simple, bajo costo                    | Bajo 4,75 mm                                   |
|                                          |                                                                | Triaxial (ASTM)                    | Exacto                                | Alto costo, complejo, bajo 4,75mm              |
| <b>Ángulo de fricción</b>                | Parámetro $\phi$ del modelo de falla Mohr-Coulomb              | Ángulo reposo sumergido            | Simple, bajo costo                    | Aproximado                                     |
|                                          |                                                                | Triaxial (ASTM)                    | Exacto                                | Caro, complejo, bajo 4,75mm                    |
| <b>Asentamiento y extensión de flujo</b> | Determinación cualitativa de la fluidez del mineral            | Uso de cono de Abrams (ASTM, JSCE) | Simple, bajo costo, material integro. | Cualitativo, poco utilizado en suelos          |

### **3 METODOLOGÍA**

Dado que el objetivo de la memoria es caracterizar a través de ensayos de laboratorio el material clasificado como “barro” en la mina Diablo Regimiento, División El Teniente, Codelco. la metodología que se describe a continuación se centra en los temas de obtención de muestras y ensayos a realizar.

#### **3.1 MUESTREO**

Se trabaja en colaboración con mina Diablo regimiento, División El Teniente, Codelco. Según la matriz de peligro utilizada en la Figura 1, se han declarado puntos en estado de peligro crítico o estado de barro. De estos puntos en estado de barro se identifica (visualmente) tres tipos de mineral:

- Mineral oxidado: Caracterizado por un color amarillento, dado probablemente por la oxidación de especies ante el contacto prolongado del mineral con el ambiente.
- Mineral no oxidado: Caracterizado por un color gris. Se cree que este mineral no ha estado expuesto de forma prolongada al ambiente.
- Mineral mixto: Muestra características propias de los dos tipos de mineral descritos anteriormente.

Con el objetivo de realizar ensayos geotécnicos al material, se solicitan muestras (300 kg) de cada una de las tres variedad de mineral de tipo barro presente en la mina, . Las muestras se obtienen de puntos declarados con entrada de “barro” en fechas recientes a la extracción de la muestra. Para la presentación de resultados se llama “Muestra 1” o “M1” a la muestra no oxidada, “Muestra 2” o “M2” a la muestra oxidada y “Muestra 3” o “M3” a la muestra mixta.

Se proporciona además información acerca de los puntos de origen de las muestras (Tabla 14). La información entregada corresponde a litología (descripción visual), granulometría (clasificación visual), relación de columna extraída y columna in-situ, historial de humedad (laboratorio de la mina), y zona que representa (Tabla 14).

Tabla 14: Información de las muestras.

| Muestra                          | No oxidado (Muestra 1)                                               | Oxidado (Muestra 2)                                                                        | Mixto (Muestra 3) |     |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----|
| Denominación Punto de extracción | DR 43 37H                                                            | DR 23 32F                                                                                  | DR 43 40H         |     |
| Zona que representa              | Barro Zona Oriental                                                  | Puntos que pasaron a barro en fase 1                                                       | -                 |     |
| Litología                        | Brecha turmalina 75%<br>CMET 10%<br>Vetillas cuarzo 5%<br>Félsico 5% | 90% quebrado (Conglomerados barro, arcilla, brecha braden con óxido de hierro)<br>10% CMET | 80% CMET          |     |
| Fecha                            | 14-07-2013                                                           | 04-09-2013                                                                                 | 23-10-2013        |     |
| Altura Extraída /Altura in-situ  | 166m / 150m (110%)                                                   | 276m / 150 m (184%)                                                                        | 103%              |     |
| Humedad (última medición)        | 6,40%                                                                | 10,60%                                                                                     | 6%                |     |
| Granulometría                    | Menor a 5cm                                                          | -                                                                                          | 85%               | 70% |
|                                  | 5cm a 25cm                                                           | -                                                                                          | 10%               | 10% |
|                                  | 25cm a 50cm                                                          | -                                                                                          | 5%                | 15% |
|                                  | 50cm a 100 cm                                                        | -                                                                                          | 0%                | 5%  |

En los puntos de extracción declarados como “barro” se aprecia visualmente gran variedad de tamaños. La apariencia general es la de un agregado con una matriz de pasta de material fino, con fragmentos de bloques y colpas que permanecen aislados en la matriz. La obtención de muestra se realiza de forma representativa (según personal de la mina) a la matriz fina en el punto de extracción, dada la imposibilidad de transportar los fragmentos grandes (Figura 12).

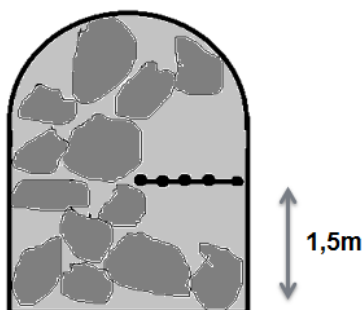


Figura 12: Muestreo de mineral en puntos declarados barro, la línea punteada negra representa desde dónde se extraería las muestras en un punto distribuido como el de la figura.



Para el trabajo en laboratorio se obtiene sub muestras representativas mediante el método de Cuarteo. Se separa cada muestra original en 8 sub muestras que a su vez son separadas mediante el mismo método para la realización de los distintos ensayos.

### 3.2 ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos son realizados por el autor de la memoria en el laboratorio de sólidos del departamento de ingeniería civil de la Universidad de Chile durante el periodo de Julio a Diciembre de 2013. En el laboratorio de sólidos se encuentra todo el equipamiento para la realización de los mismos según normas ASTM, exceptuando el Cono de Abrams, el cual es solicitado al Instituto de investigaciones y ensayo de materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile.

Los ensayos a realizar se definen en función de los parámetros que se requieren determinar (Tabla 15). El orden de los mismos se define en función de los requerimientos de cada ensayo, En la Tabla 15 se presentan los ensayos a ser realizados.

**Tabla 15: Parámetros a determinar mediante ensayos de laboratorio junto a los ensayos a realizar.**

| <b>Parámetro</b>                         | <b>Obtención en laboratorio</b>                   |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| <b>Humedad natural [%]</b>               | Secado en horno (ASTM D2216)                      |
| <b>Granulometría</b>                     | Tamizaje (ASTM D6913)                             |
| <b>Gravedad Específica</b>               | Picnómetro (ASTM D854)                            |
|                                          | Masa sumergida (ASTM C127)                        |
| <b>Límites de Atterberg</b>              | Límite líquido (ASTM D4318)                       |
|                                          | Límite plástico (ASTM D4318)                      |
| <b>Compactación máxima y mínima</b>      | Densidad mínima (ASTM D4254)                      |
|                                          | Densidad máxima (JSSFME)                          |
|                                          | Proctor Modificado (ASTM D1557)                   |
| <b>Consolidación</b>                     | Odómetro (ASTM D2435)                             |
| <b>Cohesión</b>                          | Compresión no Confinada (ASTM D2166)              |
| <b>Ángulo de fricción</b>                | Ángulo reposo sumergido (Santamarina & Cho, 2001) |
| <b>Asentamiento y extensión de flujo</b> | Cono de Abrams (ASTM C143, JSCE)                  |

## 4 RESULTADOS

### 4.1 HUMEDAD NATURAL

Las muestras fueron transportadas en bolsas plásticas selladas desde la mina hasta el laboratorio para evitar pérdidas de humedad.

Las muestras se secan a 100°C para obtener su humedad. Debido a la cantidad de mineral, cada muestra se seca en varias bandejas (alrededor de 25kg cada una) y se calcula la humedad de cada bandeja por separado.

En la Tabla 16 se muestra los resultados, se presenta el promedio y desviación estándar de humedades de las bandejas utilizadas en el secado para cada muestra,

En el anexo 8.1 se encuentra el detalle de la obtención de la humedad natural.

**Tabla 16: Humedad natural de muestras de barro.**

|                | <b>Muestra 1</b> | <b>Muestra 2</b> | <b>Muestra 3</b> |
|----------------|------------------|------------------|------------------|
| Humedad [%]    | 9,5              | 13,4             | 12,5             |
| Desv. Est. [%] | 0,3              | 0,5              | 1,3              |

### 4.2 GRANULOMETRÍA

Para la obtención de las curvas granulométricas se utiliza la técnica de tamizado (ASTM D6913-04) con lavado de finos, la cual permite conocer la distribución de tamaños desde 300 a 0.075 milímetros.

Se tamizan aproximadamente 32 kg representativos de cada muestra, con los que se procede a separar una porción gruesa (Retenidos en malla 3/8 de pulgada) que es tamizada en su totalidad, y porción fina (Pasan malla 3/8 de pulgada) desde la cual se extraen 500 gramos representativos para ser tamizados. Esta separación se debe a que la representatividad de la sub-muestra a tamizar depende del tamaño de partícula máxima de la misma, por lo cual, la fracción más fina requiere menor cantidad de material dado su menor tamaño máximo de partícula.

Se obtiene el porcentaje de masa para cada tamaño de tamiz (16 tamaños). En el Gráfico 2, cada punto representa el porcentaje de masa acumulado bajo cada tamaño de abertura de tamiz, en el mismo gráfico, en la parte superior, se muestra la clasificación de tamaños de la Tabla 1. En el anexo 8.2 se encuentran los datos con los que se obtienen estas curvas.

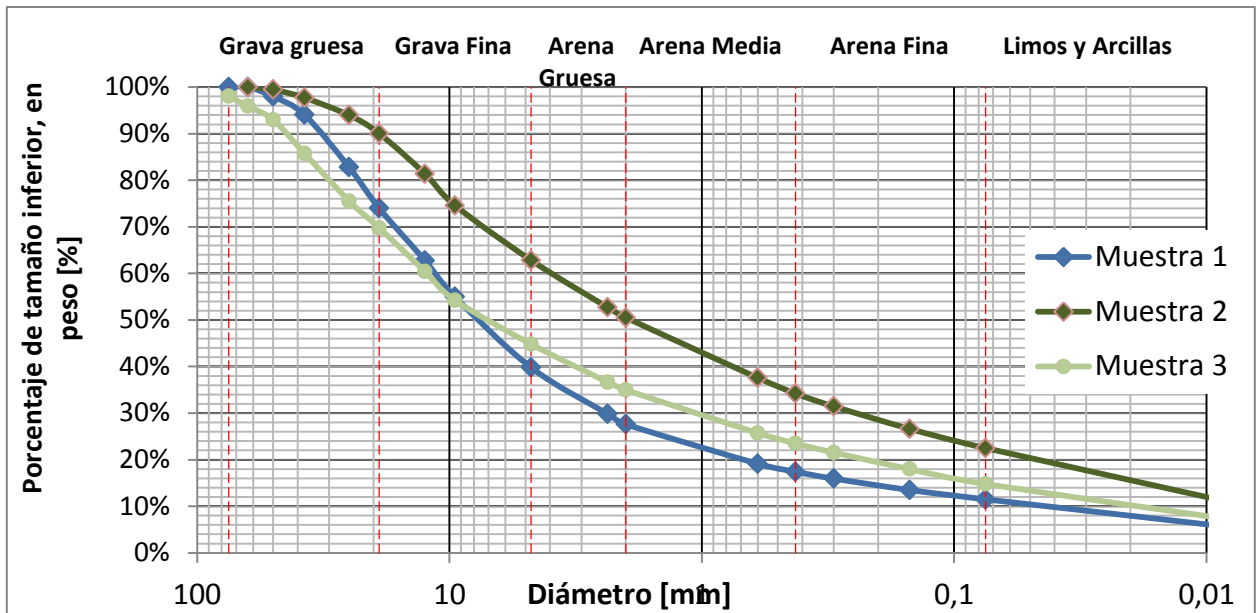


Gráfico 2: Curvas de distribución granulométrica de muestras de barro obtenidas en laboratorio.

Se observa a simple vista en el Gráfico 2 que las muestras tienen distribuciones de forma similar, sin embargo, la muestra 2 (Oxidada) presenta más finos que las otras.

El gráfico 3 presenta las curvas granulométricas completas de los puntos de extracción de origen para las muestras 2 y 3 (no se obtiene información de la granulometría del punto de origen de la muestra 1). Estas curvas se obtienen utilizando los resultados de laboratorio en conjunto con la información entregada por DET con respecto a la granulometría en terreno de las muestras.

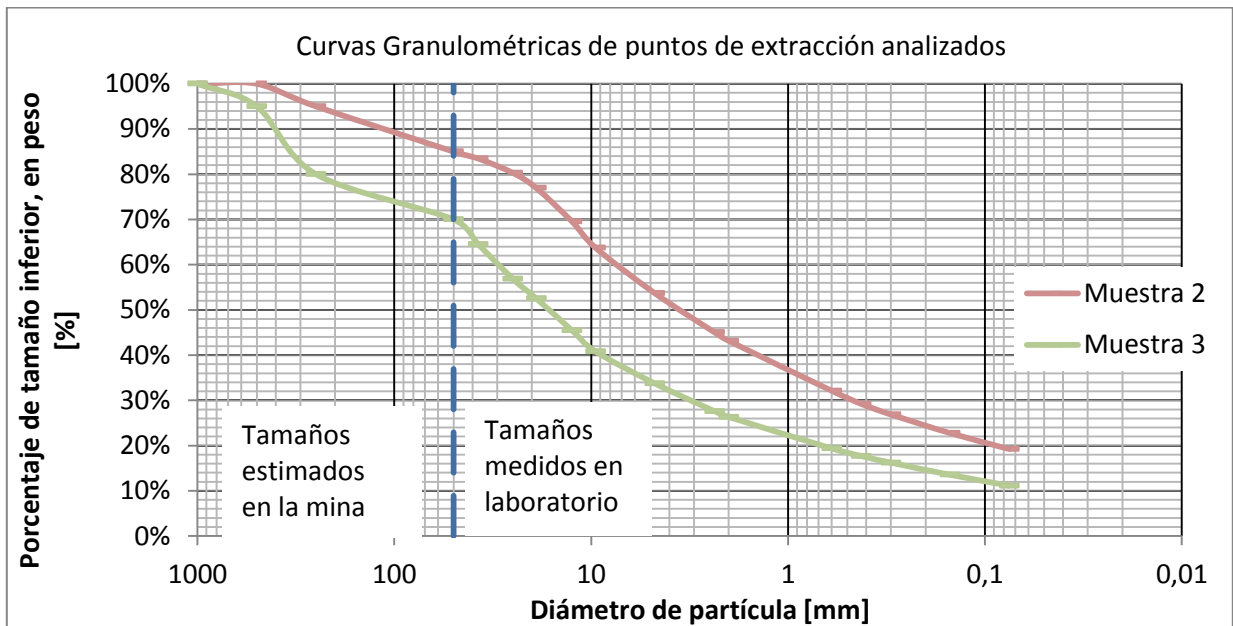


Gráfico 3: Curvas de distribución granulométrica para puntos de extracción, estimada a partir de datos de laboratorio y de la mina.

### 4.3 LÍMITES DE ATTERBERG

Se obtienen los límites líquido y plástico de las muestras (ASTM D4328-00). Notar que para la obtención de estos parámetros se utiliza la porción de la muestra que pasa la malla número 40 (0,425 mm de abertura). Los resultados se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17: Límites de Atterberg de las muestras de barro.

|                              | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Límite líquido</b>        | 21,7%     | 25,7%     | 26,1%     |
| <b>Límite Plástico</b>       | 16,9%     | 21,0%     | 19,1%     |
| <b>Índice de Plasticidad</b> | 4,8%      | 4,6%      | 7,0%      |

Estos límites se interpretan de la siguiente manera: Para la muestra 3, humedades sobre el límite líquido (26,1%) el mineral se comporta de forma líquida, para humedades entre el límite líquido (26,1%) y plástico (19,1%) se comporta de forma plástica, y para humedades menores al límite plástico (19,1%) se comporta como un sólido o semisólido. El índice de plasticidad (7%) corresponde a la diferencia entre ambos límites ( $26,1\% - 19,1\% = 7\%$ ), e indica la amplitud del rango de humedad en que el mineral se comporta de forma plástica.

Notar que estos límites se definen sólo para la porción bajo 0,425 milímetros de un suelo. En anexo 8.3 se detallan los datos obtenidos en el laboratorio con los que se calculan los límites de Atterberg.

### 4.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA

Para obtener la gravedad específica utilizando métodos de laboratorio, se utiliza el método del picnómetro (ASTM D854-02), y el método de masas sumergidas (ASTM C127-01) para tamaños bajo y sobre el tamiz número cuatro (4,75 milímetros) respectivamente. En ambas muestras se realizan cuatro repeticiones de la medición y se ensayan los tamaños bajo el tamiz número 40. En el anexo 8.4 se presenta en detalle el cálculo de la gravedad específica para cada una de estas porciones granulométricas.

La tabla 18 presenta el promedio ponderado de la gravedad específica según la porción de la muestra en peso que representan los valores obtenidos para el método del picnómetro (bajo 4,75 mm) y de la masa sumergida (sobre 4,75 mm).

Tabla 18: Resultados gravedad específica para muestras....

|                               | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Gs (4°C) Bajo malla 40</b> | 2,65      | 2,62      | 2,69      |
| <b>Gs (4°C) Bajo malla 4</b>  | 2,80      | 2,68      | 2,72      |
| <b>Gs (4°C) Sobre malla 4</b> | 2,74      | 2,71      | 2,74      |
| <b>Gs (4°C) Ponderado</b>     | 2,76      | 2,69      | 2,73      |

De los resultados en la Tabla 18 es posible concluir que la muestra 2 (oxidada) es ligeramente menos densa que la muestra 1. Además, los finos (bajo tamiz n°40) tienen una densidad menor que el resto de la muestra. El valor de esta propiedad es menor que las obtenidas en los resultados

IOZ (Call & Nicholas, et al., 1998) en donde los valores de gravedad específica se encuentran sobre 3.

#### 4.5 DENSIDAD MÁXIMA Y MÍNIMA

Estos ensayos se realizan mediante la utilización de un molde de volumen conocido. La densidad mínima se obtiene del llenado del mismo mediante un embudo (ASTM D4254-00). La densidad máxima se obtiene según el método japonés de vibración manual (JSSFME), es decir, mediante golpes al molde luego del depósito de capas de muestra.

Ambos ensayos se realizan a la porción de la muestra que pasa por el tamiz número 4, es decir, bajo 4.75 milímetros. En la Tabla 19 se presentan los valores de densidad máximas y mínimas obtenidas. En el anexo 8.5 se muestran los datos con que se calculan estas densidades.

La densidad máxima obtenida mediante este método es válida sólo para suelos con un porcentaje de finos menor al 10%. Ninguna de las tres muestras cumple esta condición, por lo que el resultado de densidad máxima con este método es sólo referencial.

**Tabla 19: Densidad máxima y mínima para muestras 1, 2 y 3.**

|                                | <b>Muestra 1</b> | <b>Muestra 2</b> | <b>Muestra 3</b> |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Densidad mínima [gr/cc]</b> | 1,47             | 1,34             | 1,41             |
| <b>Densidad máxima [gr/cc]</b> | 1,91             | 1,72             | 1,99             |

#### 4.6 PROCTOR MODIFICADO

La densidad máxima se obtiene mediante compactación del material en un volumen conocido a diferentes humedades. Esto permite generar curvas de densidad versus humedad, que generalmente tienen un punto máximo de densidad, esta es la llamada densidad máxima. Se mide originalmente la densidad húmeda máxima, utilizando el valor de humedad a la que se alcanza dicha densidad, se calcula la densidad del mineral sin agua o densidad seca. La tabla 20 presenta las densidades máximas y humedad óptima para las tres muestras. En el Anexo 8.6 se muestra el detalle de la obtención de este parámetro.

**Tabla 20: Densidad máxima Proctor modificado muestras.**

|                                | <b>Muestra 1</b> | <b>Muestra 2</b> | <b>Muestra 3</b> |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Densidad Húmeda [gr/cc]</b> | 2,40             | 2,25             | 2,40             |
| <b>Densidad Seca [gr/cc]</b>   | 2,21             | 2,09             | 2,22             |
| <b>Humedad [%]</b>             | 8,3              | 11,2             | 8,4              |

#### 4.7 COMPRESIÓN NO CONFINADA

Para este ensayo comúnmente se utilizan probetas talladas de una muestra obtenida en condiciones in-situ. En el caso de este estudio es imposible obtener muestras inalteradas, por lo que se utilizan probetas re-moldeadas de altura de 10 cm y de diámetro de 5 cm. El material a utilizar es aquel que pase el tamiz número 4 (4.75mm) para cada muestra.

Se planifican los ensayos de tal manera de conocer la resistencia a la compresión no confinada para distintas condiciones de compactación inicial y humedad, y que permita comparar los

resultados de las tres muestras. Para esto se escogen como variables de los ensayos la Densidad relativa (Capítulo 2.2.4) y la Saturación (Capítulo 2.2.2). Para evaluar el efecto que tiene la cementación, se planifican ensayos en probetas secadas al horno con condiciones iniciales idénticas a las anteriores.

En la Figura 13 se presenta un resumen de la planificación de los ensayos de compresión no confinada a realizar, junto con los valores de las variables a fijar.

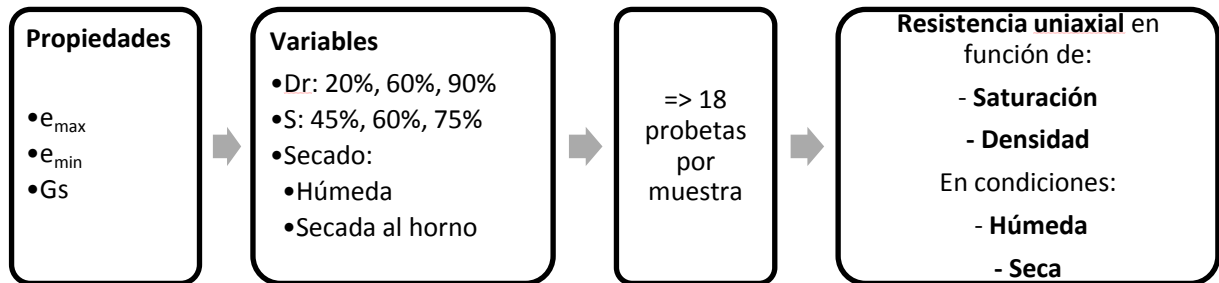


Figura 13: Resumen de la planificación de ensayos de compresión no confinada

Se preparan un total de 54 probetas en un molde cilíndrico de diámetro y altura fijos. La humedad de cada ensayo se fija agregando agua al mineral previo a su moldeo. La densidad se fija pesando el mineral que corresponde y procediendo a compactar en 5 capas acorde al volumen del molde.

Si bien se tiene humedades y densidades “nominales”, estas pueden variar considerablemente durante el armado y/o preparación de las probetas, es por esto que se miden las dimensiones, peso y humedad de cada probeta de forma adicional para obtener densidades y humedades “reales”. De la observación de resultados se desprende que las saturaciones nominales coinciden casi perfectamente con las reales, no así con las densidades relativas, que resultan ser mayores que el nominal en casos sueltos, y menores al nominal en casos densos.

Los resultados de la resistencia en función de la densidad relativa y humedad en condición húmeda se presentan en el Gráfico 4, Gráfico 5 y Gráfico 6 para las muestras 1, 2 y 3, respectivamente. El valor de resistencia a la compresión en estos gráficos representa la resistencia máxima obtenida de las curvas esfuerzo-deformación de cada ensayo (Detalle en anexo 8.7).

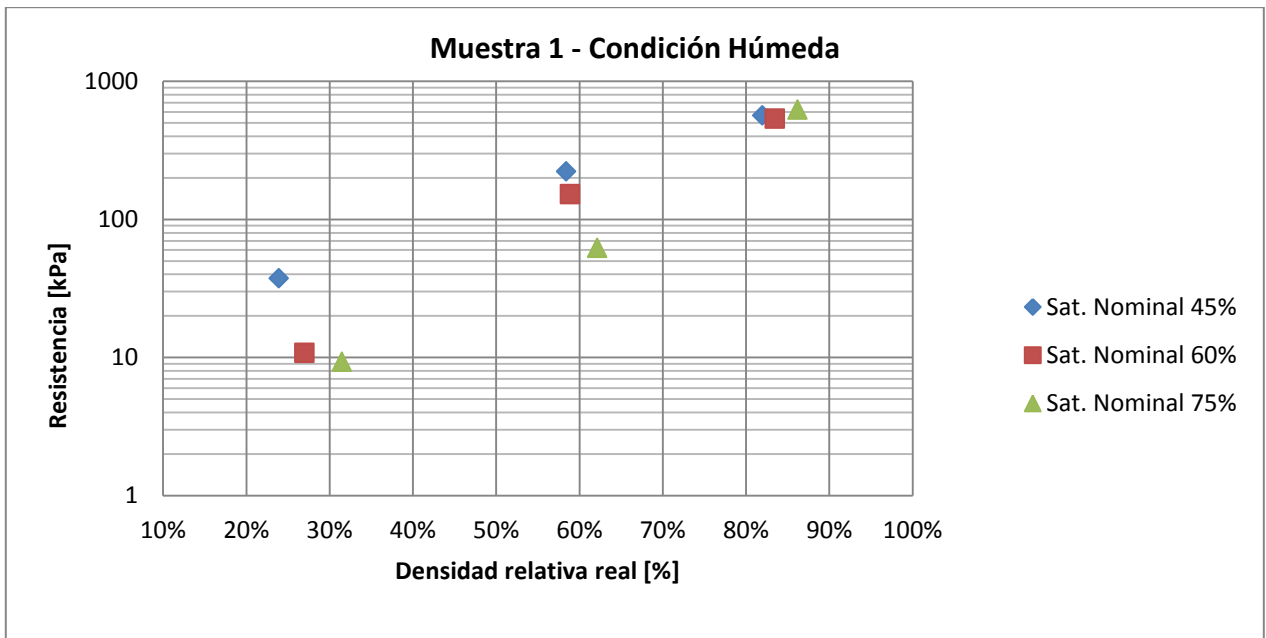


Gráfico 4: Compresión no confinada en función de la densidad relativa y humedad m 1, condición húmeda.

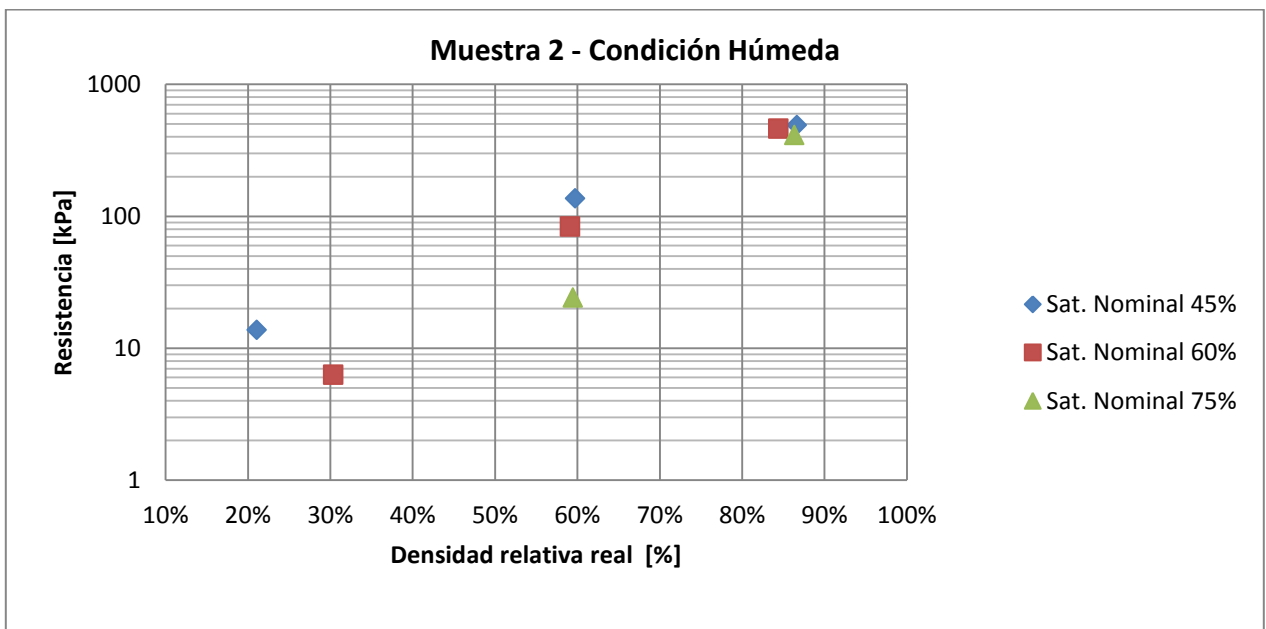
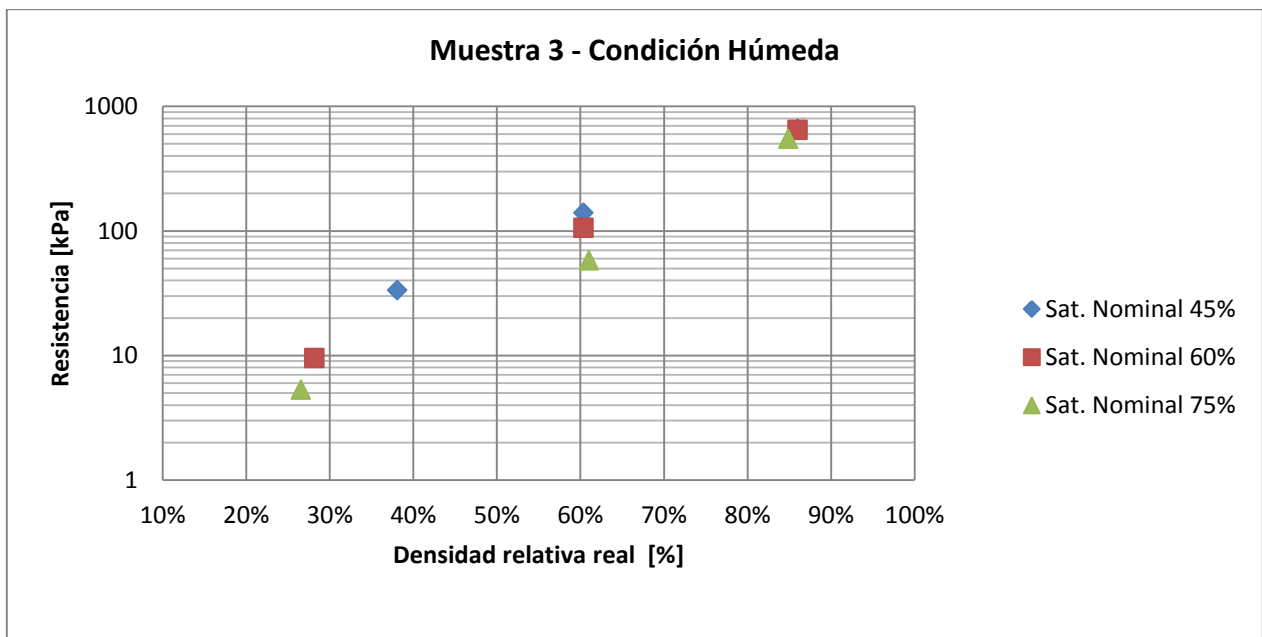


Gráfico 5: Compresión no confinada en función de la densidad relativa y humedad muestra 2, condición húmeda.



**Gráfico 6: Compresión no confinada en función de la densidad relativa y humedad muestra 3, condición húmeda.**

Se observa que la resistencia crece significativamente a medida que aumenta la densidad, mientras que a densidad constante, la resistencia aumenta levemente respecto a la saturación. Las tres muestras presentan muy bajas resistencias (cercanas a cero) para empaquetamientos sueltos. Para empaquetamientos densos la muestra 2 (Oxidada) resiste levemente menos que las otras dos.

De acuerdo a la revisión bibliográfica (capítulo 2.2.4), una probeta compactada a una humedad menor al óptimo (de Proctor modificado) tiene más resistencia que una compactada con una humedad mayor al óptimo. Se grafica la cohesión versus la humedad de compactación para cada densidad relativa y muestra (Gráfico 36, Gráfico 37 y Gráfico 38 en anexo 8.7) y se observa que para probetas de igual compactación, con humedades mayor y menor al óptimo, aquellas más húmedas son levemente menos resistentes (excepto en el caso de la muestra 1, más densa). Sin embargo la resistencia varía respecto de la humedad (para cada compactación) y no parece existir alguna variación en particular en torno a la humedad óptima.

La condición de secado al horno se presenta en términos de la Saturación de moldeo o saturación inicial (Gráfico 7, Gráfico 8 y Gráfico 9), puesto que en todos los casos las probetas se encuentran con una humedad y saturación del 0% al momento de realizar el ensayo. El valor de resistencia en estos gráficos representa la resistencia máxima en las curvas esfuerzo-deformación de cada ensayo (Detalle en anexo 8.7).



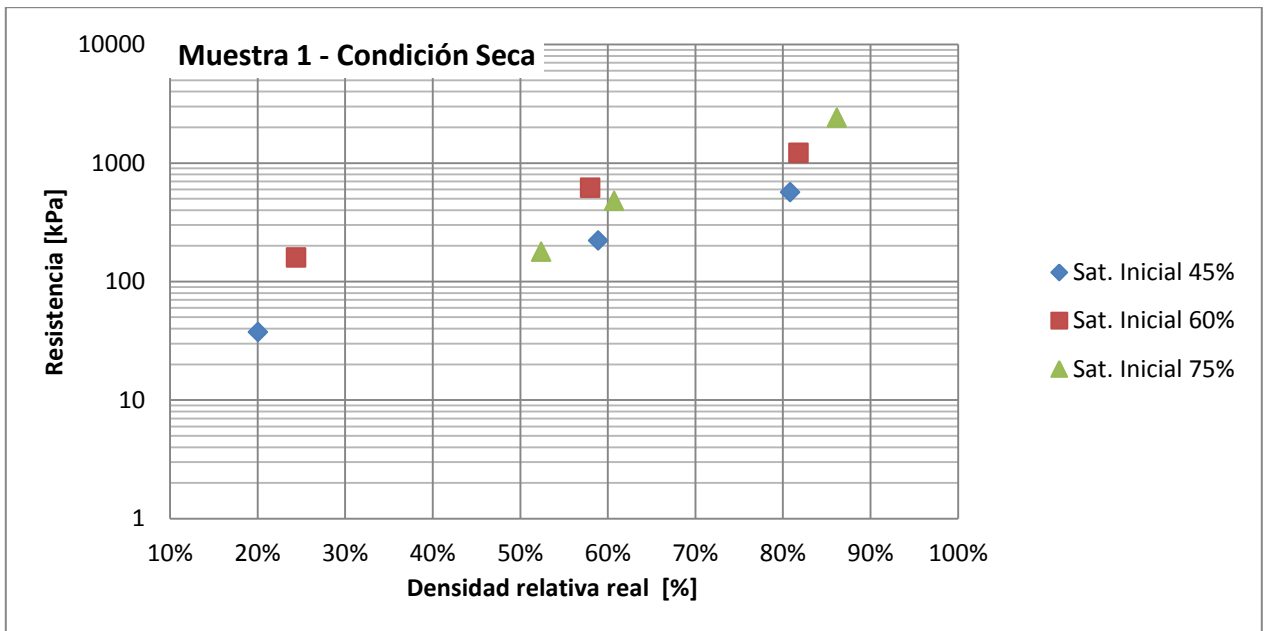


Gráfico 7: Compresión no confinada muestra 1 condición seca.

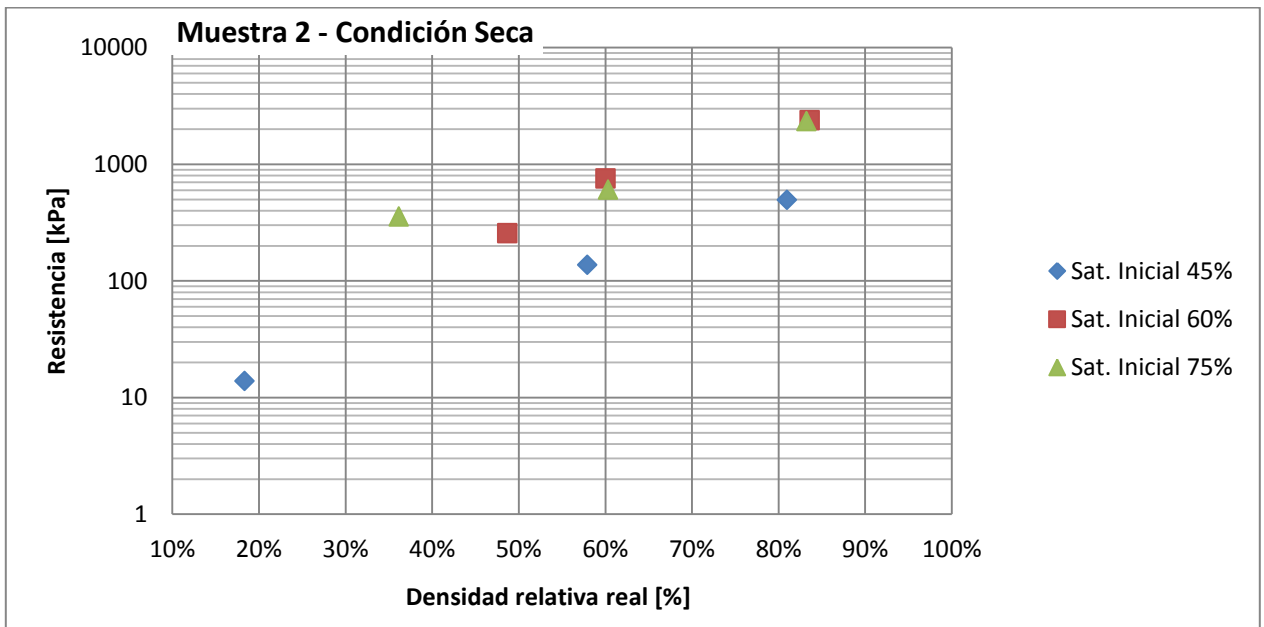
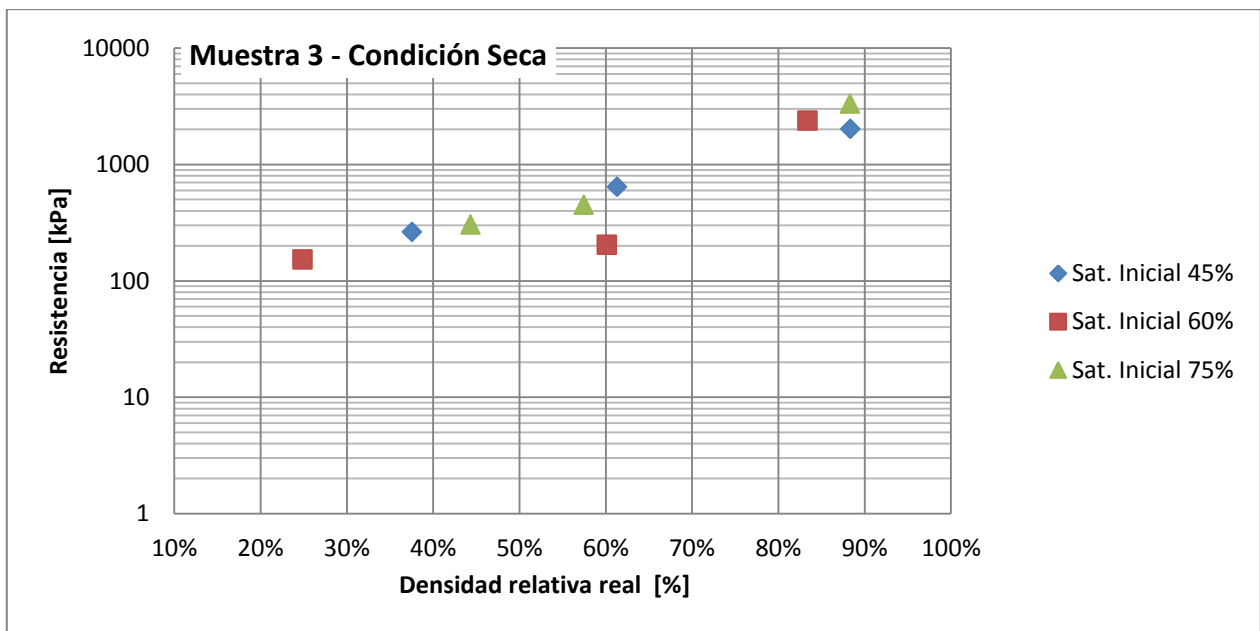


Gráfico 8: Compresión no confinada muestra 2 condición seca.



**Gráfico 9: Compresión no confinada muestra 3 condición seca.**

En este caso nuevamente los cambios en la densidad relativa generan grandes cambios en la resistencia, la humedad de moldeo es relevante en las muestras más compactas, puesto que a mayor saturación inicial se observa mayor resistencia.

También se ha calculado el módulo de deformación para cada ensayo realizado, estos resultados se presentan en anexo 8.7, desde el Gráfico 39 al Gráfico 44. El caso húmedo es similar al de la resistencia, a mayor densidad relativa, mayor es el módulo de deformación. A menor saturación, mayor es el módulo, sin embargo los módulos de probetas densas (DR nominal 90%) la saturación es irrelevante. El caso secado al horno, el módulo también muestra una tendencia creciente respecto de la densidad, sin embargo la tendencia no es clara respecto de la saturación.

#### **4.8 ASENTAMIENTO Y EXTENSIÓN DE FLUJO**

La planificación de ensayos en cono de Abrams se realiza de forma análoga a los ensayos de compresión no confinada. Se fija distintos valores de saturación y compactación con tal de evaluar el Asentamiento ante distintas condiciones. En el Gráfico 10, el Gráfico 11 y el Gráfico 12 se muestra los resultados de este ensayo. En anexo 8.10 se encuentran los datos con que se construyen estos gráficos..

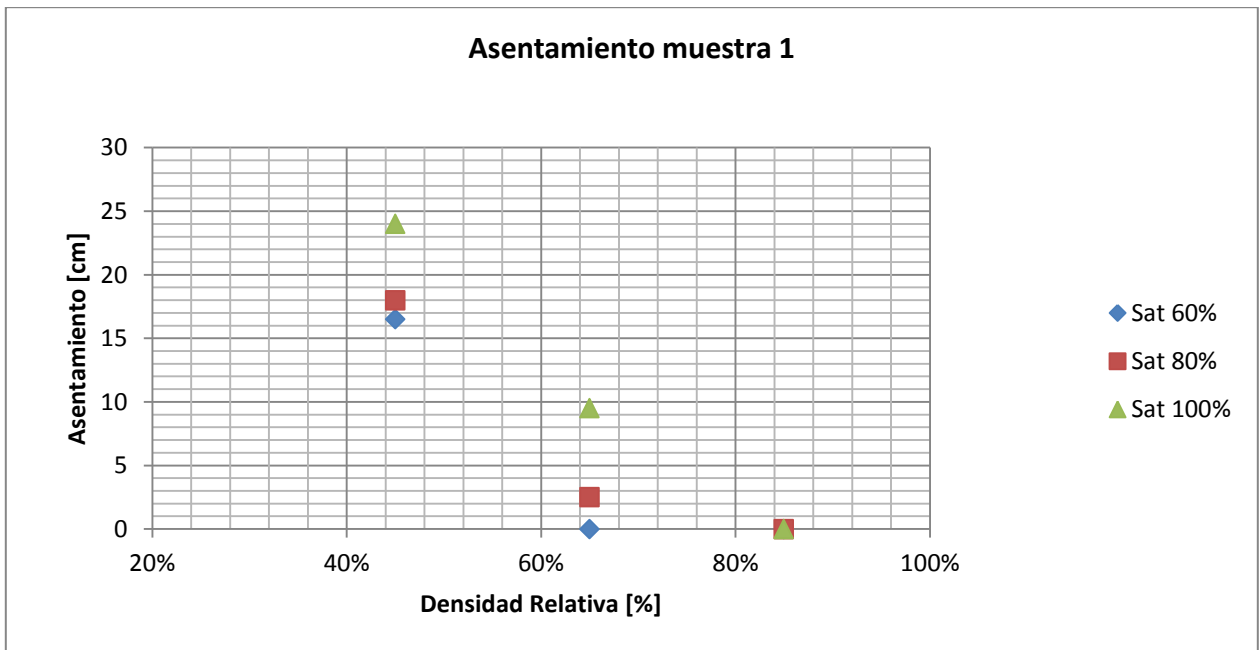


Gráfico 10: Asentamiento muestra 1.

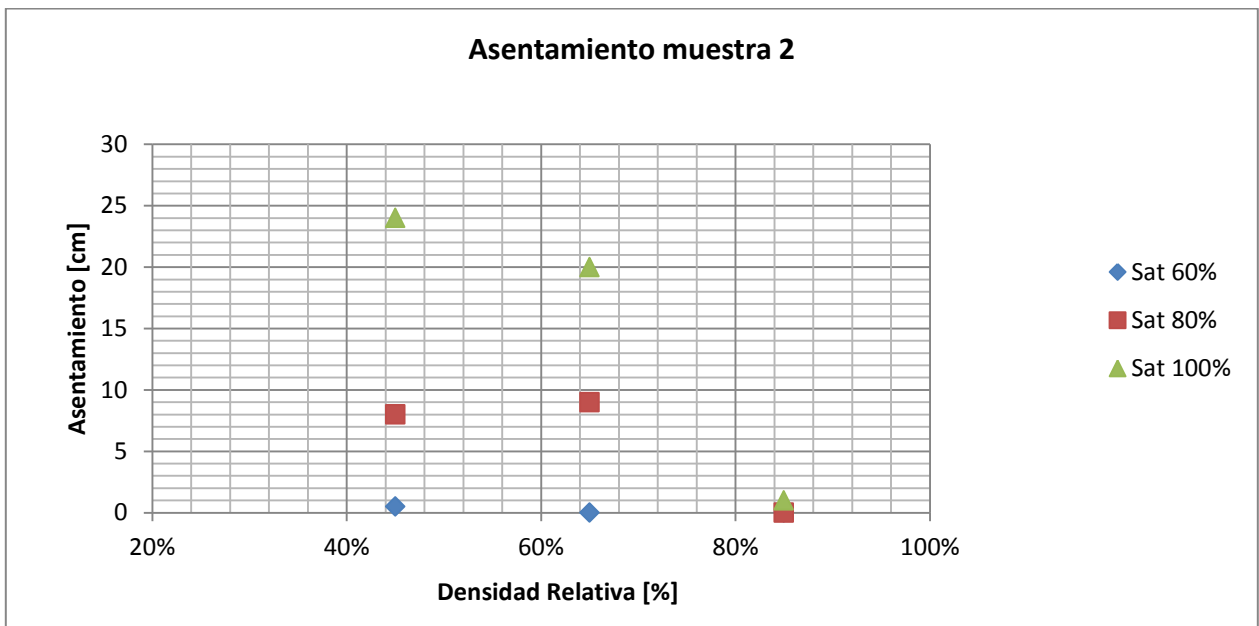


Gráfico 11: Asentamiento muestra 2.



Gráfico 12: Asentamiento muestra 3.

#### 4.9 ÁNGULO DE FRICCIÓN

El ángulo de fricción se estima para la porción de material bajo 4,75mm de tamaño a partir del método propuesto por Santamarina y Cho el 2001. La medición se realiza utilizando recipientes cilíndricos de diámetros 7cm y 15 cm. Sin embargo, no fue posible medir el ángulo para los matraces de 7 cm de diámetro, ya que las partículas finas en suspensión impiden identificar con claridad dicho ángulo.

Los ángulos medidos en el matraz de 20 cm de diámetro se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21: Ángulos de fricción

|        | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| Ángulo | 34°       | 34°       | 32°       |

Se obtienen ángulos de fricción similares.

#### 4.10 CONSOLIDACIÓN

Los ensayos de consolidación se llevan a cabo según la norma ASTM D2435-03 (Método B, 100% de consolidación en cada incremento). Debido al tamaño definido para las probetas (3 cm de altura, 7 cm de diámetro) se utiliza sólo partículas que pasen por el tamiz de 40 mallas, es decir bajo 0,425 mm de diámetro. Se utiliza la densidad mínima obtenida en la sección 4.5, que corresponde a la porción de las muestras menor a 4,75 mm de tamaño. Los resultados se presentan en función del esfuerzo e índice de vacíos.

Se calcula el coeficiente de consolidación (Tabla 22) para cada fase de carga. Los índices de compresión y expansión (Tabla 23) se calcularon utilizando la ecuación (18) para las curvas de carga y descarga respectivamente. En el anexo 8.8 se encuentran los datos con los que se construyen estos gráficos y se calculan estos índices.

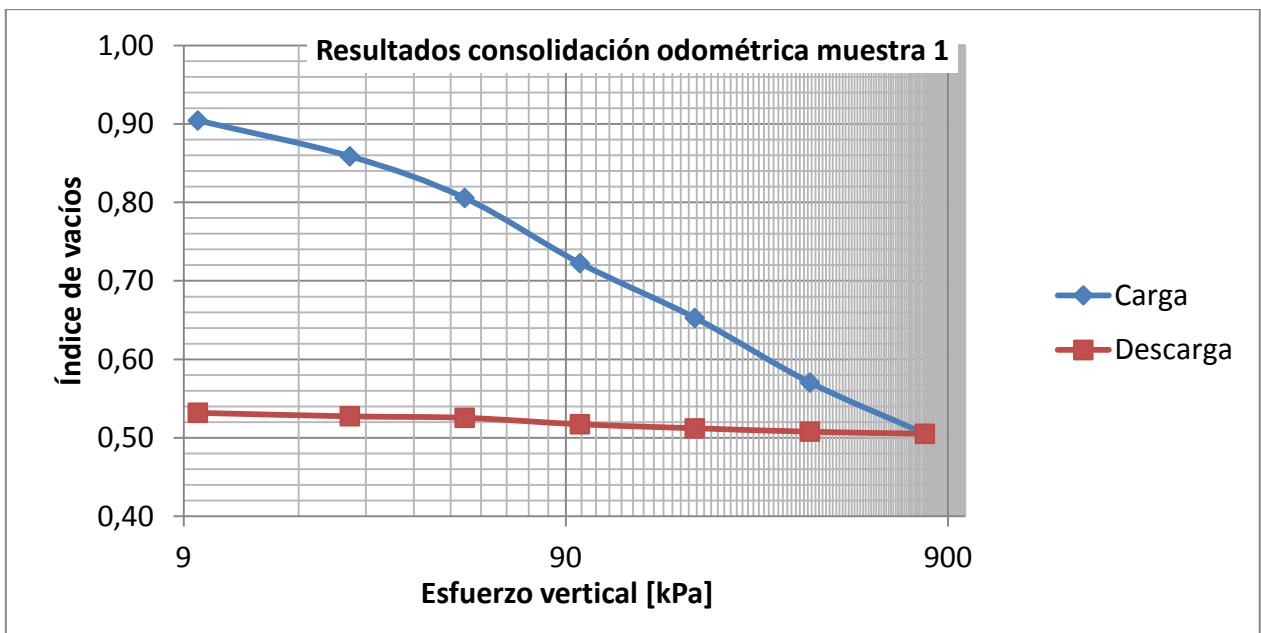


Gráfico 13: resultados consolidación odométrica, muestra 1

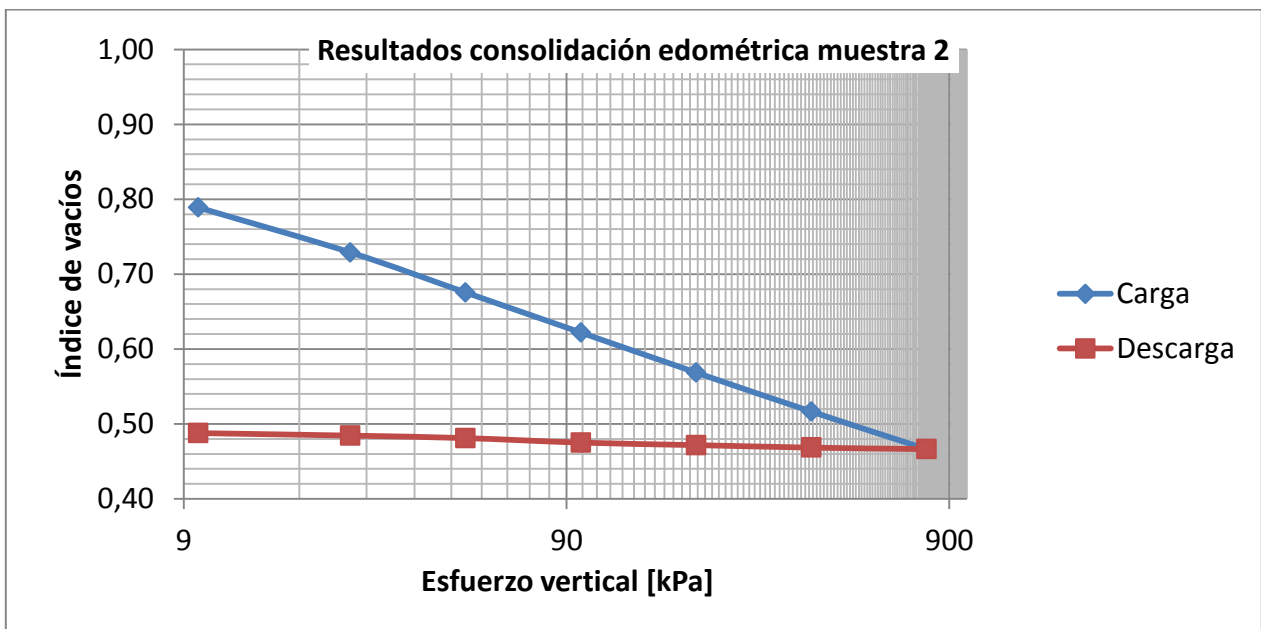


Gráfico 14: Resultados consolidación odométrica, muestra 2

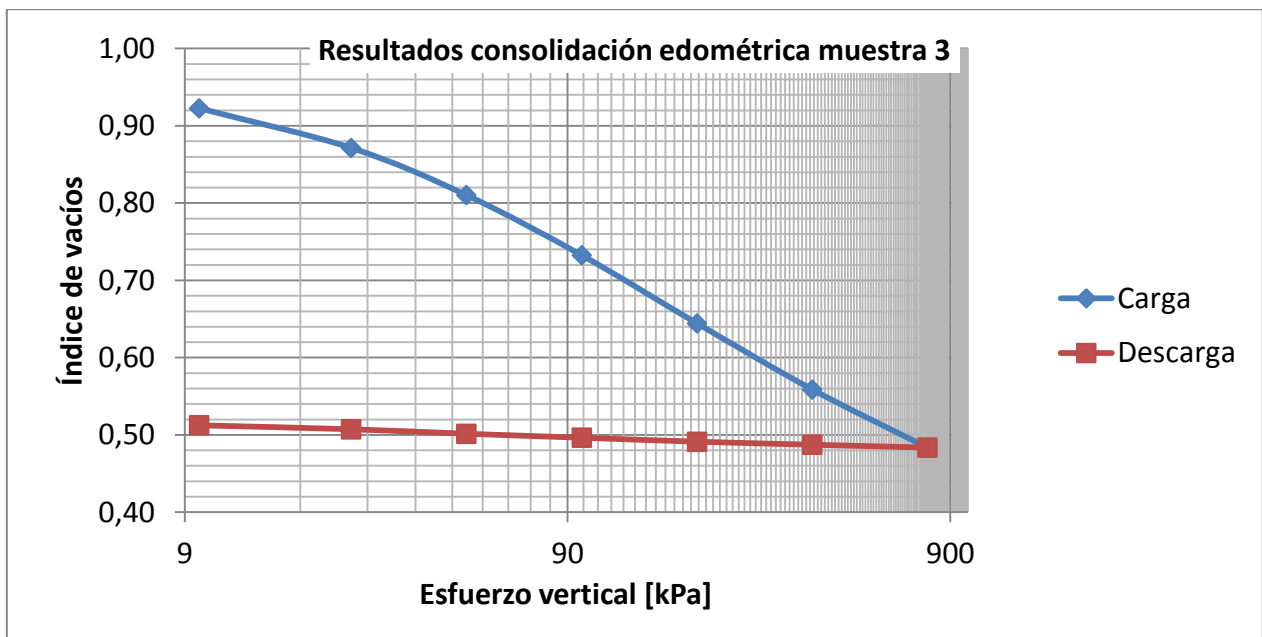


Gráfico 15: Resultados consolidación edométrica, muestra 3

Tabla 22: Coeficiente de consolidación para las distintas muestras (Promedio del obtenido para cada fase de carga)

| $\sigma_v$ [kPa]                 | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| $C_v$ [m <sup>2</sup> /Año]      | 0,22      | 382,60    | 1,09      |
| Desv. Est. [m <sup>2</sup> /Año] | 0,15      | 192,10    | 0,82      |

Tabla 23: Índice de compresión (Cc) e índice de expansión (Cr) para cada muestra.

| Índice | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| Cc     | 0,249     | 0,174     | 0,271     |
| Cr     | 0,014     | 0,011     | 0,015     |

## 5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 REPRESENTATIVIDAD DE ENSAYOS

La metodología de cada tipo de ensayo especifica un tamaño máximo de partícula admisible, por lo tanto se ha debido utilizar tamaños menores al máximo original de cada muestra para la mayoría de los casos. En la Tabla 24 se exhibe el porcentaje de las muestras (en peso) con tamaños admisibles en cada tipo de ensayo, dependiendo del tamaño máximo para cada uno de ellos.

Como se enuncia en capítulo 2.4, el método de la matriz sólo puede ser utilizado en el casos en que la matriz represente al menos el 35%, es decir que los sobre tamaños representen menos del 65% para que se encuentren en un estado flotante en la matriz. La mayoría de los ensayos cumple con esta condición, con excepción de los límites de Atterberg y la Consolidación.

Tabla 24: Porcentaje representado de cada muestra para cada ensayo.

| Ensayo               | Tamaño máximo [mm] | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|----------------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| Humedad              | -                  | 100,0%    | 100,0%    | 100,0%    |
| Granulometría        | -                  | 100,0%    | 100,0%    | 100,0%    |
| Límites de Atterberg | 0,425              | 17,4%     | 34,2%     | 23,5%     |
| Gravedad específica  | -                  | 100,0%    | 100,0%    | 100,0%    |
| Densidad Max. Min.   | 4,75               | 39,8%     | 62,8%     | 44,8%     |
| Proctor Modificado   | 19                 | 74,0%     | 90,0%     | 69,8%     |
| Compr. No confinada  | 4,75               | 39,8%     | 62,8%     | 44,8%     |
| Cono Abrams          | -                  | 100,0%    | 100,0%    | 100,0%    |
| Ángulo de Fricción   | 4,75               | 39,8%     | 62,8%     | 44,8%     |
| Consolidación        | 0,425              | 17,4%     | 34,2%     | 23,5%     |

### 5.2 CLASIFICACIÓN DEL MINERAL

En la Tabla 25 se muestra la clasificación por tamaño de partícula, y el porcentaje en peso de la muestra que corresponde a cada categoría enunciada en la Tabla 1. Como se puede observar, alrededor del 80% de las muestras corresponde a gravas y arenas.

Tabla 25: Porcentajes de muestra según clasificación por tamaño

| Denominación USCS     | Rango de tamaño [mm] |       | Muestra 1 |       | Muestra 2 |       | Muestra 3 |       |       |
|-----------------------|----------------------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-------|
| <b>Bolos</b>          | 75                   | 300   | 0,0%      | 0%    | 0,0%      | 0%    | 2,0%      | 2%    |       |
| <b>Grava</b>          | Gruesa               | 19    | 75        | 26,0% | 60,2%     | 10,0% | 37,2%     | 28,3% | 53,2% |
|                       | Fina                 | 4,75  | 19        | 34,2% |           | 27,2% |           | 25,0% |       |
| <b>Arena</b>          | Gruesa               | 2     | 4,75      | 12,2% | 28,3%     | 12,3% | 40,3%     | 9,8%  | 30,0% |
|                       | Media                | 0,425 | 2         | 10,2% |           | 16,3% |           | 11,5% |       |
|                       | Fina                 | 0,075 | 0,425     | 5,9%  |           | 11,7% |           | 8,7%  |       |
| <b>Limo y arcilla</b> | 0                    | 0,075 | 11,5%     | 11,5% | 22,4%     | 22,4% | 14,6%     | 14,6% |       |

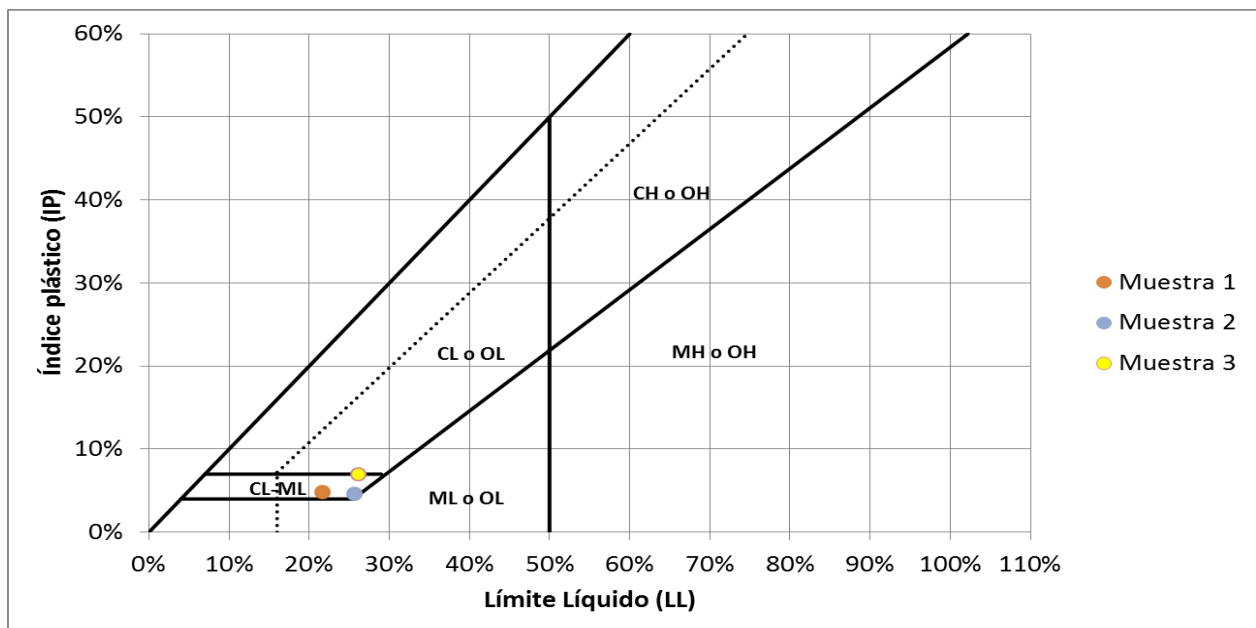
En la Tabla 26, se encuentran indicadores de distribución granulométrica.  $D_{60}$ ,  $D_{30}$  y  $D_{10}$  que indican el tamaño bajo el cual se encuentra el 60%, 30% y 10% (en peso) de cada muestra. Los indicadores  $C_u$  y  $C_c$  corresponden a coeficiente de uniformidad y de curvatura respectivamente y sirven para evaluar la gradación del mineral.  $C_u$  y  $C_c$  se obtienen a partir de  $D_{60}$ ,  $D_{30}$  y  $D_{10}$ , mediante de las siguientes fórmulas:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}}$$

**Tabla 26: Indicadores de distribución granulométrica**

|          | Muestra 1 | Muestra 2 | Muestra 3 |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| $D_{60}$ | 11,350    | 3,907     | 12,289    |
| $D_{30}$ | 2,385     | 0,243     | 1,045     |
| $D_{10}$ | 0,043     | 0,007     | 0,018     |
| $C_u$    | 266       | 580       | 672       |
| $C_c$    | 11,7      | 2,3       | 4,9       |

Los límites líquidos e índices de plasticidad se grafican en la carta de plasticidad para clasificación de finos en el Gráfico 16. Las 3 muestras corresponden a arcillas y limos de baja plasticidad (CL-ML).



**Gráfico 16: Carta de plasticidad de finos USCS**

Según el sistema de clasificación USCS (ASTM-D2487, 2000), se utiliza los resultados para obtener la categoría en que se clasifica cada muestra. Los valores utilizados para la clasificación, sus categorías y símbolos asociados se resumen en la Tabla 27.



**Tabla 27: Categorización de muestras según clasificación USCS.**

|                      | <b>Muestra 1</b>                                      | <b>Muestra 2</b>                        | <b>Muestra 3</b>                         |
|----------------------|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>% Finos</b>       | 11,5%                                                 | 22,5%                                   | 14,8%                                    |
| <b>% Arena</b>       | 28,3%                                                 | 40,3%                                   | 40,3%                                    |
| <b>% Grava</b>       | 60,2%                                                 | 37,2%                                   | 53,2%                                    |
| <b>C<sub>u</sub></b> | 266                                                   | 580                                     | 672                                      |
| <b>C<sub>c</sub></b> | 12                                                    | 2                                       | 5                                        |
| <b>Tipo Finos</b>    | CI-MI                                                 | CI-MI                                   | CI-MI                                    |
| <b>Grupo</b>         | GW-GC                                                 | SC-SM                                   | GC-GM                                    |
| <b>Descripción</b>   | <b>Grava bien Graduada con arcilla limosa y arena</b> | <b>Arena limosa arcillosa con grava</b> | <b>Grava limosa, arcillosa con arena</b> |

Si bien las 3 muestras quedan clasificadas en distintas categorías, estas son sensibles a pertenecer a diferentes categorías variando levemente uno de sus parámetros, como por ejemplo lo son el porcentaje de grava, arena y finos.

### 5.3 ÍNDICE DE VACÍOS

Para obtener el índice de vacíos máximo y mínimo, se utiliza la ecuación (5), gravedad específica, densidad mínima (Tabla 19) y densidad máxima seca obtenida con el ensayo de proctor modificado (Tabla 20). Los resultados se presentan en la Tabla 28.

**Tabla 28: índice de vacíos máximo y mínimo**

|                                   | <b>Muestra 1</b> | <b>Muestra 2</b> | <b>Muestra 3</b> |
|-----------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Densidad mínima [gr/cc]</b>    | 1,47             | 1,34             | 1,41             |
| <b>Dens. Máx. Proctor [gr/cc]</b> | 2,21             | 2,09             | 2,22             |
| <b>G<sub>s</sub></b>              | 2,80             | 2,68             | 2,72             |
| <b>e<sub>max</sub></b>            | 0,90             | 1,00             | 0,93             |
| <b>e<sub>min</sub></b>            | 0,27             | 0,28             | 0,22             |

El índice de vacíos máximo corresponde al estado con mayor cantidad de vacíos, y por lo tanto a la densidad mínima, así también el índice de vacíos mínimo indica la proporción de vacíos en la densidad máxima. Las densidades mínima y máxima de las muestra 1 y 3 son muy similares, por lo que sus índices de vacíos también lo son. La muestra 2 tiene menor densidad que las demás tanto en su condición de compactación máxima como mínima.

Si se compara estos índices de vacíos con los de la Tabla 2, se puede observar que las muestras se encuentran en un rango típico de arenas limosas y arenas finas a gruesas. Según la clasificación de la Tabla 27, sería esperable encontrar valores similares a los de arenas limosas y grava, sin embargo, para este ensayo se ha utilizado sólo tamaños menores a 4,75 mm (Tabla 24), es decir se ha excluido las gravas y por lo tanto el resultado es coherente con la fracción de material evaluado.

## 5.4 COHESIÓN

A partir de los resultados en compresión no confinada, y utilizando la ecuación (17), se obtiene la cohesión para las distintas condiciones evaluadas. Además se sobrepone la clasificación de la cohesión según la Tabla 5. Estos resultados se muestran en el Gráfico 17, el Gráfico 18 y el Gráfico 19.

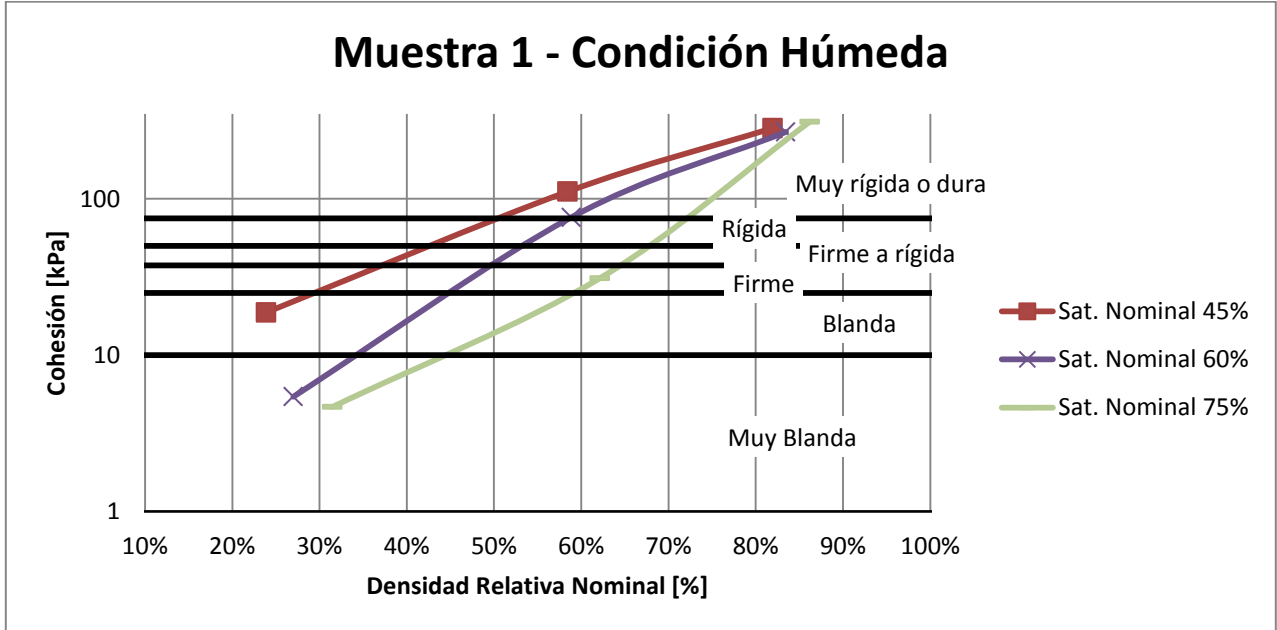


Gráfico 17: Cohesión Muestra 1

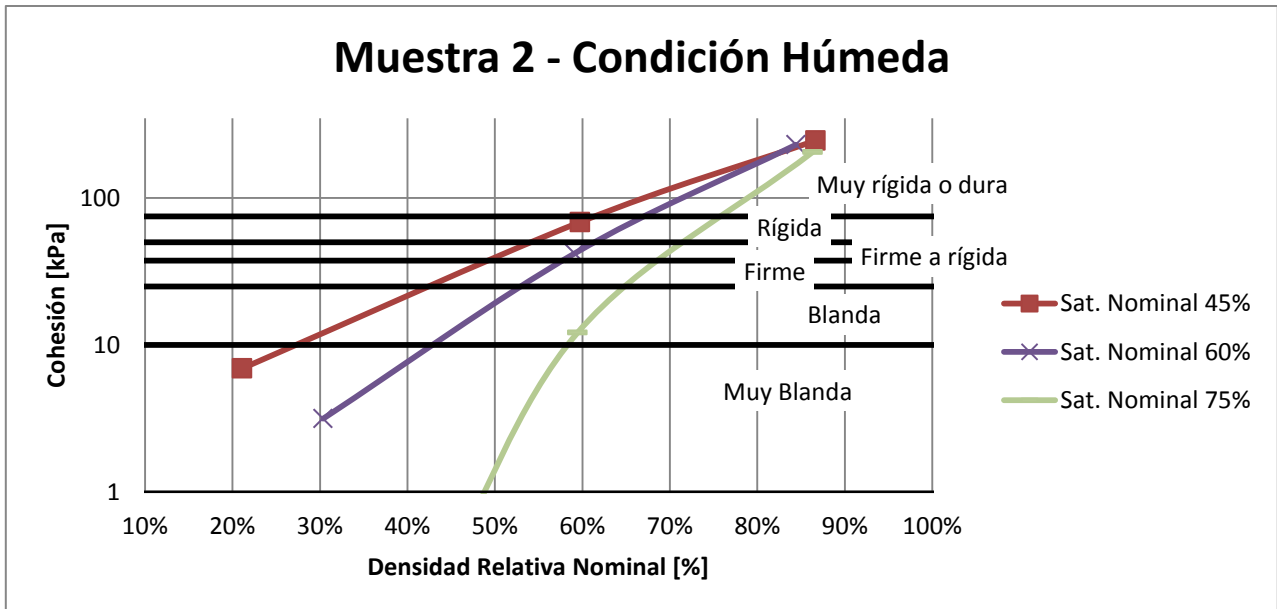
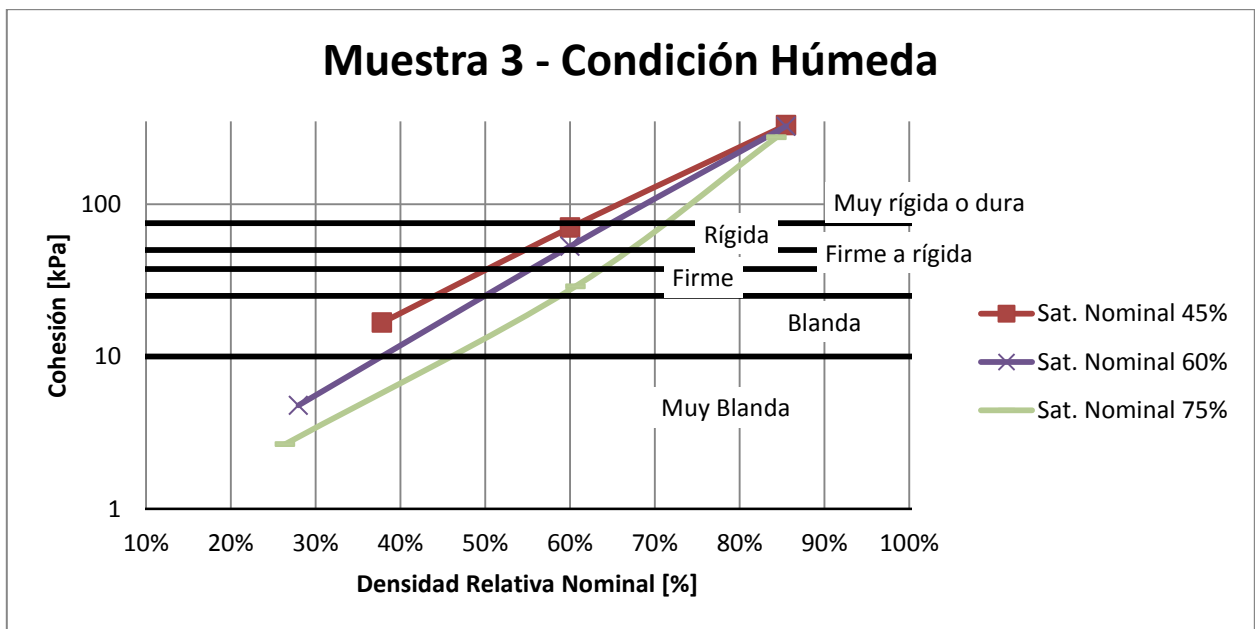


Gráfico 18: Cohesión Muestra 2



**Gráfico 19: Cohesión Muestra 3**

Se observa en el Gráfico 17, el Gráfico 18 y el Gráfico 19 que en estado inicial compacto ( $D_r \approx 80\%$ ) la cohesión es dura y la saturación inicial es poco relevante, ya que sólo se observan leves diferencias en la resistencia ese caso. La muestra 2 exhibe menores resistencias para iguales densidades relativas que el resto de las muestras, sin embargo esto puede ser debido a que los índices de vacío máximo y mínimo en la muestra 2 son mayores, lo que genera una densidad seca menor que en las otras muestras para igual densidad relativa. Para evaluar este fenómeno se grafican los resultados en función de la densidad seca, sin distinguir entre saturaciones iniciales, pero si entre muestras (Gráfico 20).

Del Gráfico 20 se desprende que la cohesión sigue una tendencia en función de la densidad seca para cada muestra, sin embargo al realizar una interpolación exponencial para cada muestra, se observa que la tendencia de la muestra 2 es diferente de las muestras 1 y 3. Es necesario notar que los estados más densos que se evalúan en muestras 1 y 3, no son posibles en muestra 2, de ahí que el análisis en función de la densidad relativa es de utilidad.

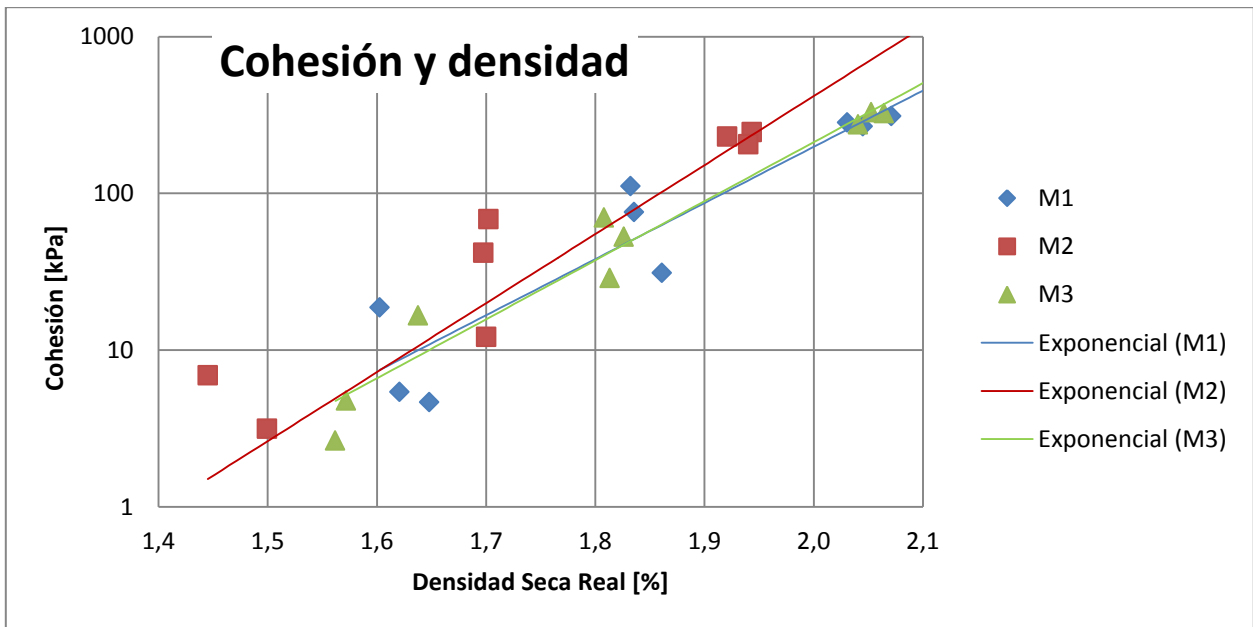


Gráfico 20: Cohesión en función de la densidad seca para las 3 muestras en condición húmeda

A partir de los resultados (4.7) se observa que el mineral secado al horno tiene una resistencia notablemente mayor que el húmedo. En el Gráfico 21 se grafica la cohesión promedio (en donde se promedian distintas saturaciones) para cada muestra en condiciones seca y húmeda. Se observa que la cohesión máxima en condición húmeda (DR nominal 90%) es similar a la cohesión a densidad media (DR nominal 50%) en condición seca. En general, para igual densidad relativa, la condición seca tiene mayor cohesión que la condición húmeda, además, a menor densidad relativa, mayor es esta diferencia, tal como se detalla en la Tabla 29, en donde se muestra el cociente entre cohesiones secas y húmedas promedio para cada muestra y densidad relativa.

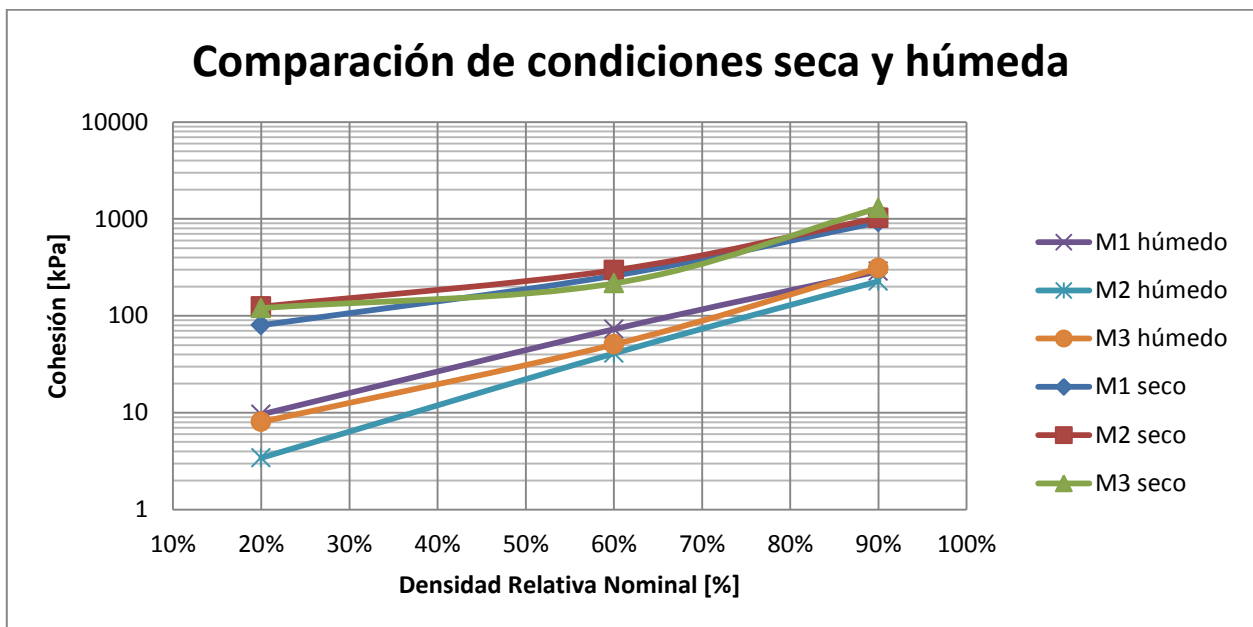


Gráfico 21: Comparación de cohesión para condición seca y húmeda.

Tabla 29: Relación entre cohesión seca y húmeda

| Densidad Relativa Nominal | Muestra 1                                     | Muestra 2 | Muestra 3 |
|---------------------------|-----------------------------------------------|-----------|-----------|
|                           | Cociente: (Cohesión Seca) / (Cohesión Húmeda) |           |           |
| 20%                       | 8,3                                           | 36,3      | 14,9      |
| 60%                       | 3,6                                           | 7,2       | 4,3       |
| 90%                       | 3,2                                           | 4,5       | 4,2       |

#### 5.4.1 HUMEDADES LÍMITE

Los ensayos de compresión no confinada fueron planificados en función de la densidad relativa y saturación, sin embargo se puede graficar la cohesión en función de la humedad. A continuación se presenta el Gráfico 22, en donde se muestra los resultados de cohesión en función de la humedad en detalle para las categorías menos resistentes.

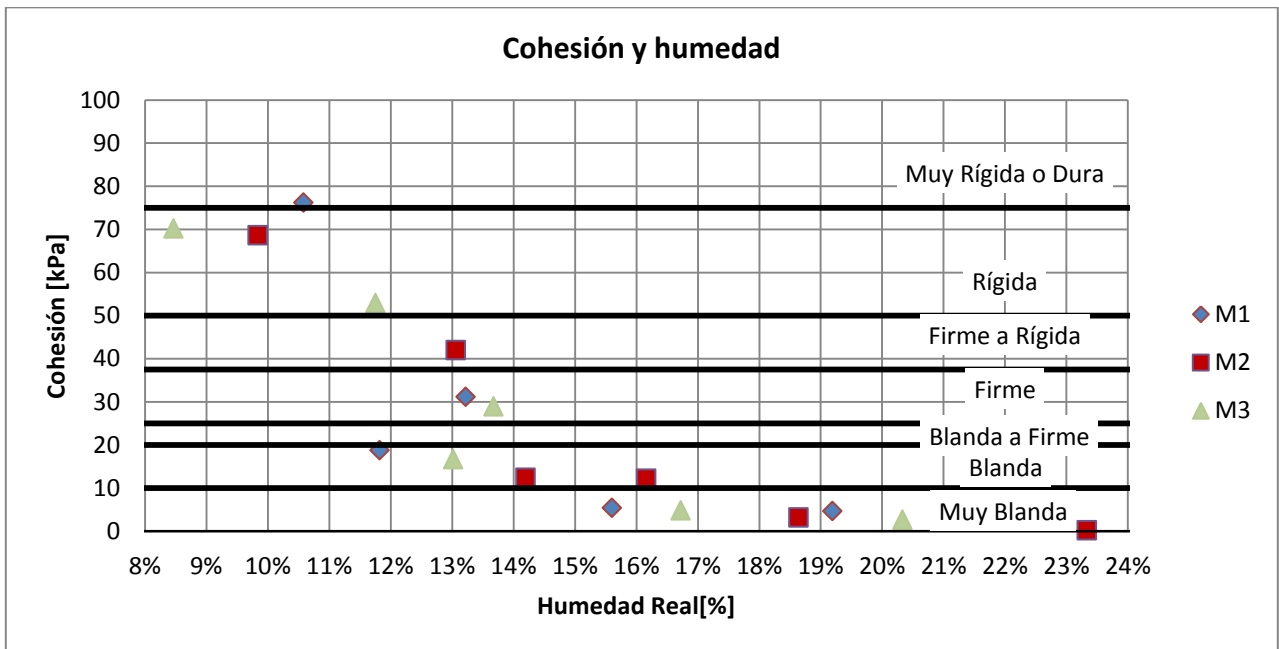


Gráfico 22: Cohesión en función de humedad para bajas resistencias.

A partir del gráfico anterior, se puede interpolar valores de humedad límite en función de las categorías de la Tabla 5. Se asume que en ningún caso el mineral se encuentra en estado líquido, puesto que tienen suficiente cohesión como para mantener la forma del molde previo al ensayo. Se asume el estado de Cohesión “Muy Blanda” como análogo a un estado plástico, con esto se define el límite plástico de cohesión (LPC) como humedad a la que se intersecta la línea que divide el estado de cohesión “Blanda” y “Muy Blanda”. Para definir los límites plásticos de cohesión, se interpola entre los puntos que se encuentran sobre y debajo de la línea límite para cada muestra. En el Gráfico 23 se muestra un acercamiento del Gráfico 22 donde se señalan los límites plásticos de cohesión obtenidos mediante el método descrito anteriormente.

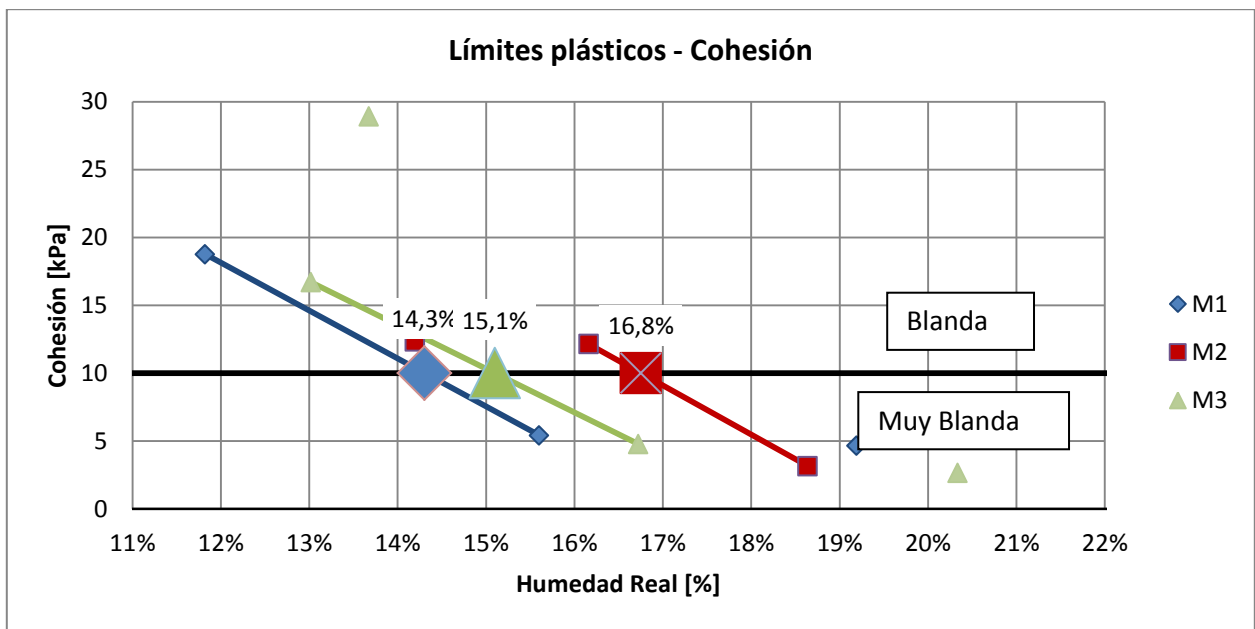


Gráfico 23: Límites plásticos de cohesión para las 3 muestras

En la Tabla 30 se resume el límite plástico de cohesión y el límite plástico de Atterberg obtenido por el método de Casagrande. Se deduce que para las 3 muestras los límites plásticos de cohesión son menores a los de Atterberg. La diferencia entre estos límites varía para cada muestra, sin embargo se mantiene el orden, es decir, la muestra 2 (Oxidada) es la que tiene mayor límite, le sigue la muestra 3 (Mixta) y finalmente la muestra 1 (Sulfurada) es la de menor valor de límite.

La diferencia encontrada entre los límites plásticos de Atterberg y de cohesión recién obtenidos, es en promedio 3.63% (con 0.9% de desviación estándar). Esta diferencia puede ser explicada dado que los ensayos de compresión no confinada se realizan para una porción de partículas más gruesa que los límites de Atterberg. Asumiendo que las partículas más finas llenan los vacíos entre las más gruesas y dado que las partículas gruesas tienen una menor cantidad de vacíos (en su interior) por unidad de masa que un conjunto de partículas más finas de la misma masa, entonces la humedad no se distribuye uniformemente dentro del conjunto de partículas, una mayor cantidad de agua tiende a permanecer en el subconjunto fino de partículas que en el grueso, lo que genera que posiblemente en las partículas más finas que de un conjunto que alcanza LPc, se alcance efectivamente LP.

Tabla 30: Comparación entre límites plásticos y límites plásticos de cohesión.

|            | M1    | M2    | M3    |
|------------|-------|-------|-------|
| LP         | 16,9% | 21,0% | 19,1% |
| LPc        | 14,3% | 16,8% | 15,1% |
| Diferencia | 2,6%  | 4,3%  | 4,0%  |

## 5.5 ASENTAMIENTO Y FLUIDEZ

A partir de los resultados de los ensayos de asentamiento en que se utilizó cono de Abrams, y las categorías de la Tabla 7, se construyen gráficos de asentamiento, densidad relativa y saturación, análogos a los mostrados para la cohesión.

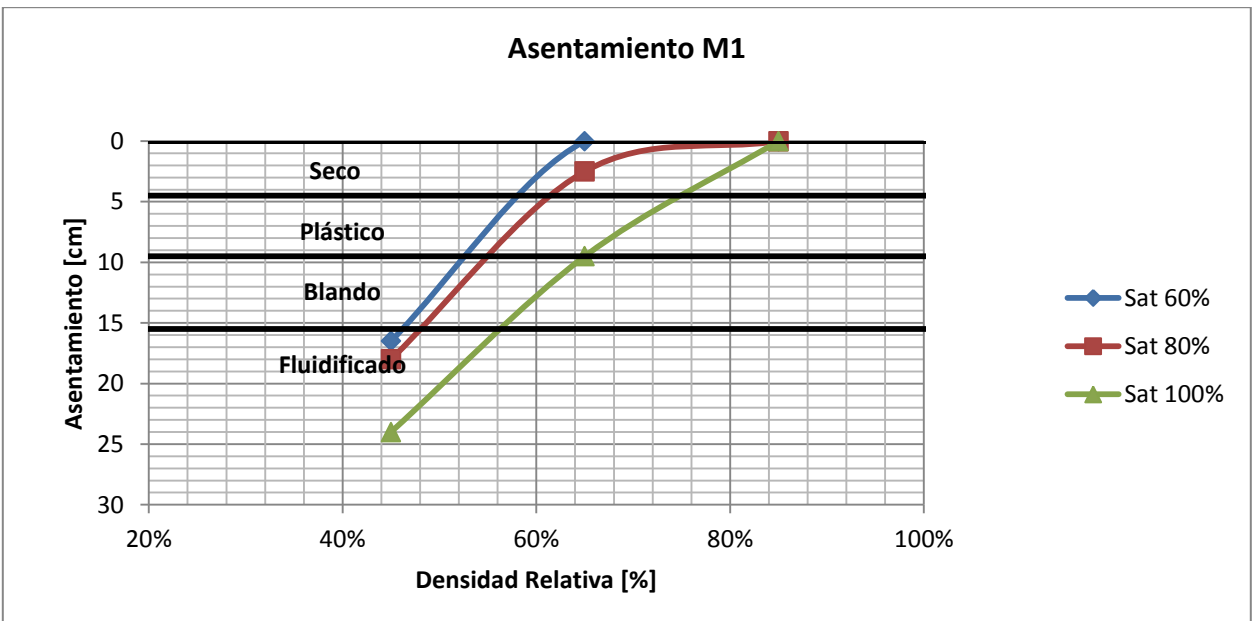


Gráfico 24: Asentamiento y clasificación Muestra 1

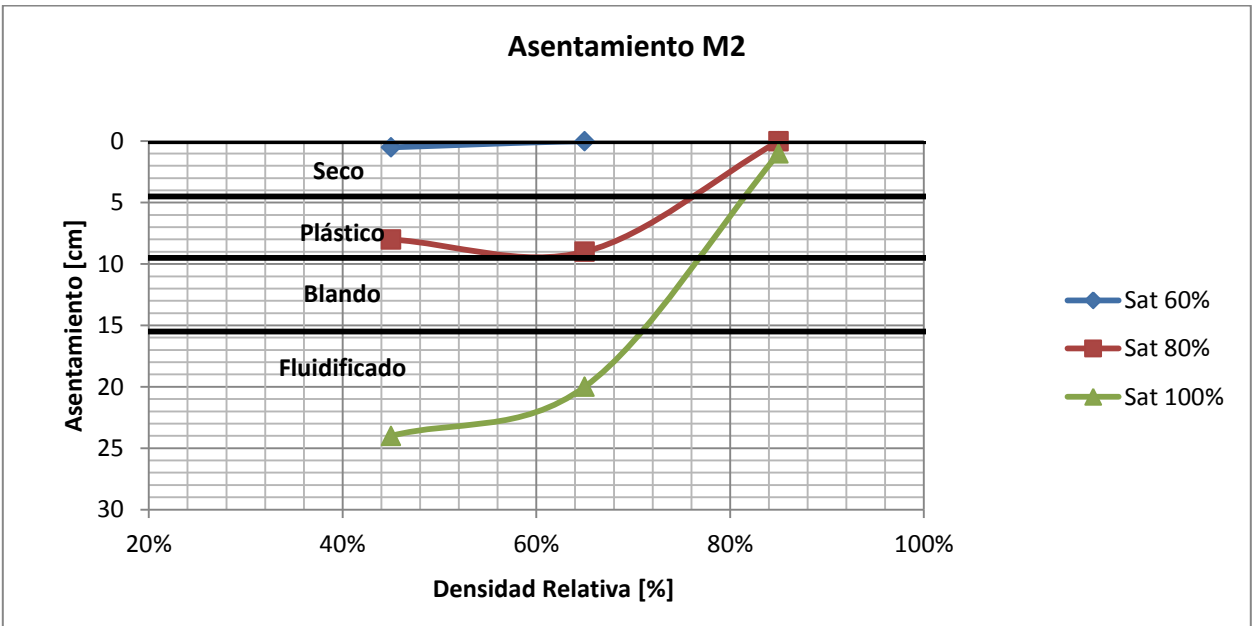


Gráfico 25: Asentamiento y clasificación Muestra 2

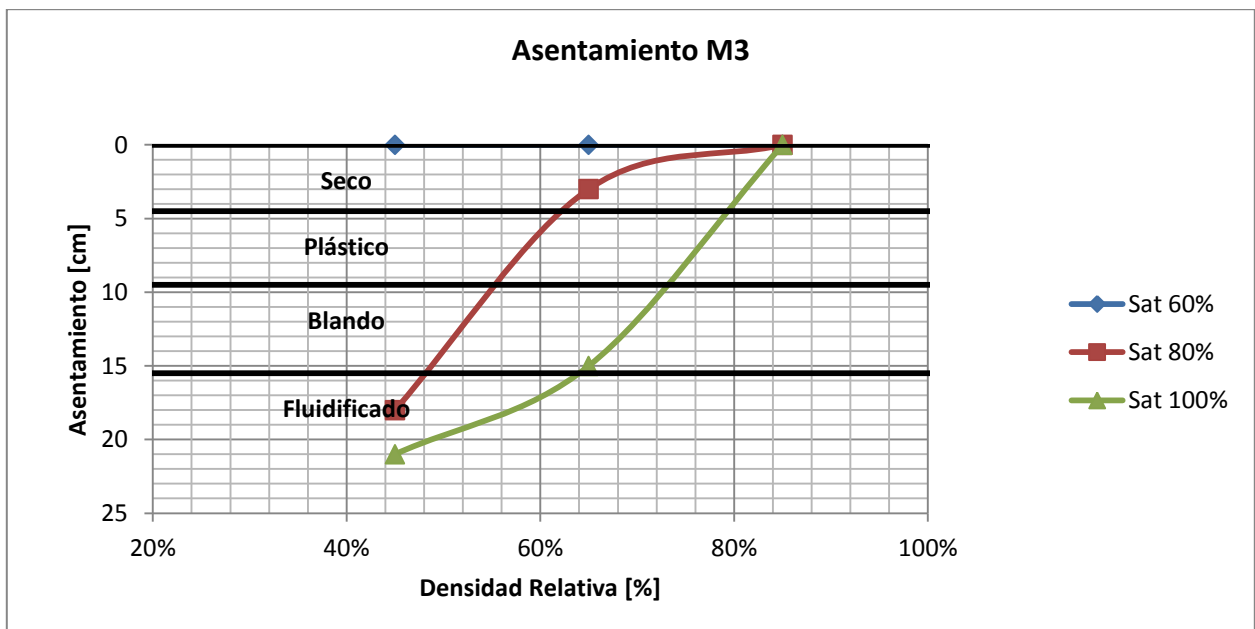


Gráfico 26: Asentamiento y clasificación Muestra 3

Del Gráfico 24, el Gráfico 25 y el Gráfico 26 puede observarse que el asentamiento está ligado a la densidad relativa, sin embargo para las muestras 2 y 3, el asentamiento es nulo para bajas saturaciones incluso si la densidad relativa es baja, por lo que la saturación es una variable de importancia en la evaluación del asentamiento.

La medición del asentamiento se realiza vía el colapso bajo su propio peso de un molde, es por esto que en este caso (a diferencia del estudio de la cohesión) se centra en la fluidez del material, ya que no se aplican esfuerzos adicionales al peso del mineral mismo. La condición fluidificada, que corresponde a asentamientos mayores a 15.5 [cm] a saturaciones sobre 60% para densidad relativa menor a 45% en muestra 1, en cambio en muestras 2 y 3, ocurre para altas saturaciones y densidades relativas medias a bajas.

### 5.5.1 HUMEDADES LÍMITE

Al tabular los resultados en función de la humedad para cada muestra, se puede definir análogo al caso de la cohesión, un límite plástico de asentamiento (en la frontera “Seco” y “Plástico”) y además un límite líquido de asentamiento (en la frontera “Blando” y “Fluidificado”). Estos límites se definen con la intersección entre las fronteras e interpolaciones entre puntos más cercanos a distintos lados de las mismas, priorizando los puntos de humedad más baja, de forma de no sobreestimar las humedades límite.

En el Gráfico 27 y el Gráfico 28 se presenta los límites líquido y plástico de asentamiento respectivamente, obtenidos con la metodología definida anteriormente.



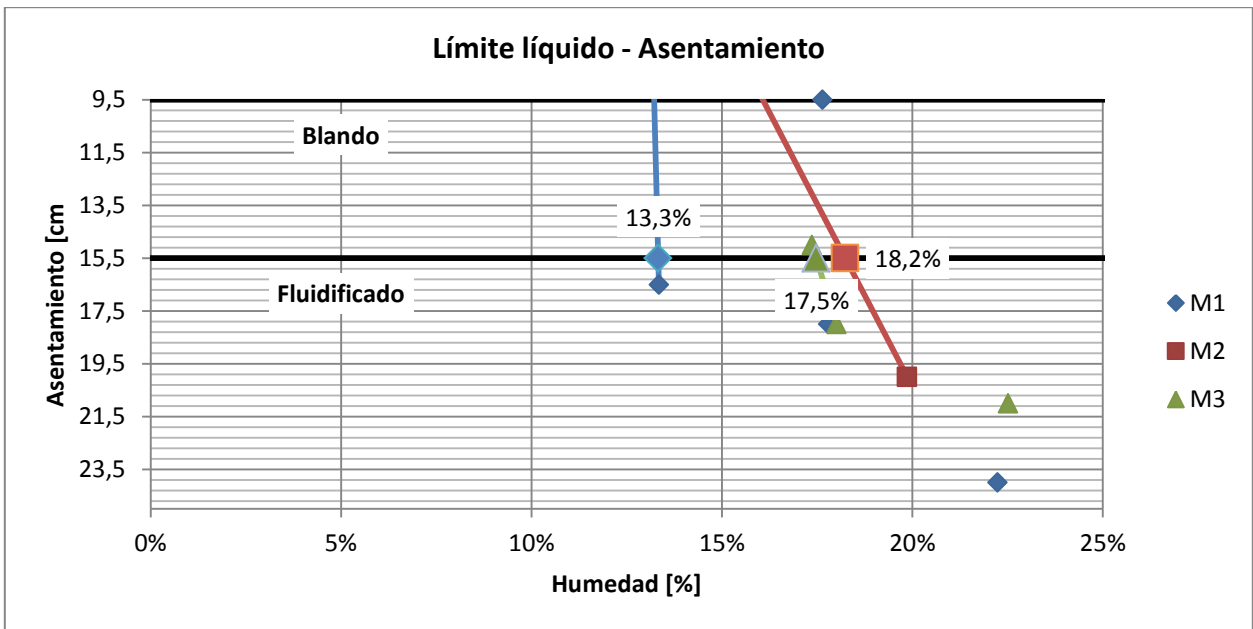


Gráfico 27: Límite líquido de asentamiento.

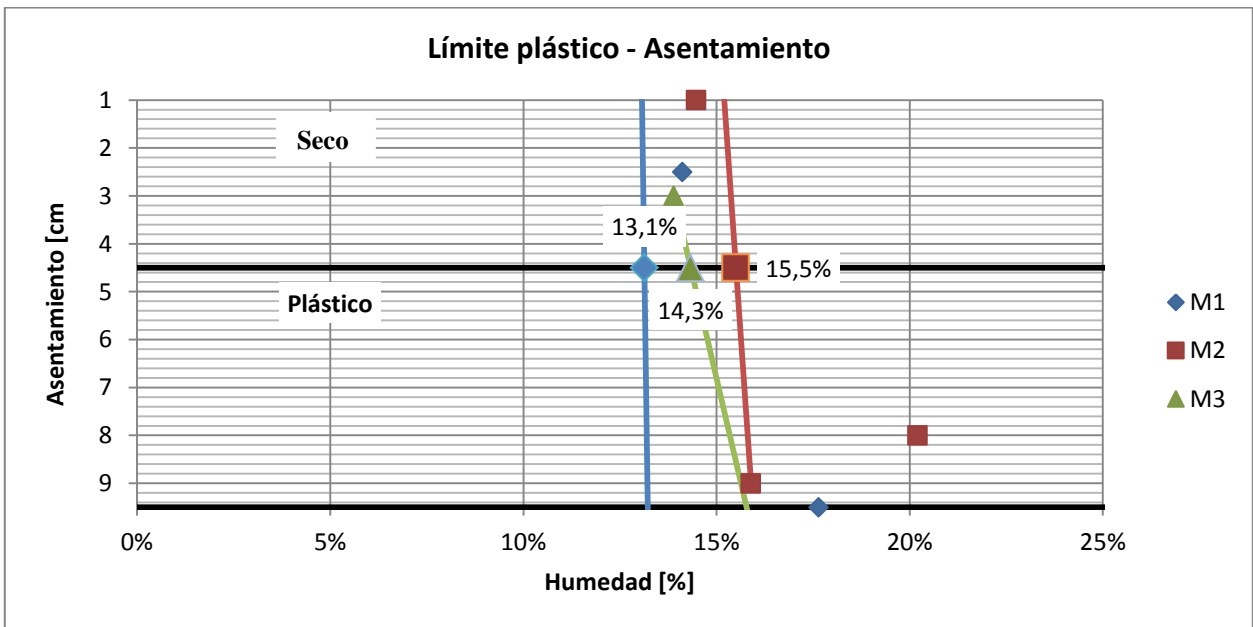


Gráfico 28: Límite plástico de asentamiento.

Tabla 31: Comparación límite líquido de asentamiento y límite líquido convencional de Atterberg.

|             | M1    | M2    | M3    |
|-------------|-------|-------|-------|
| LL          | 21,7% | 25,7% | 26,1% |
| LLa         | 13,3% | 18,2% | 17,5% |
| Dif. LL-LLa | 8,4%  | 7,4%  | 8,6%  |

**Tabla 32: Comparación límite plástico de asentamiento y límite plástico convencional de Atterberg.**

|                    | <b>M1</b> | <b>M2</b> | <b>M3</b> |
|--------------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>LP</b>          | 16,9%     | 21,0%     | 19,1%     |
| <b>LPa</b>         | 13,1%     | 15,5%     | 14,3%     |
| <b>Dif. LP-LPa</b> | 3,8%      | 5,5%      | 4,8%      |

En la Tabla 31 y la Tabla 32 se compara los límites de asentamiento definidos y calculados con los límites convencionales de Atterberg. Se observa que el límite líquido de asentamiento es alrededor de 8.13% (con 0.6% desviación estándar) menor al límite de Atterberg, además el límite plástico de asentamiento es alrededor de un 4.7% (con 0.6% desviación estándar) menor al de Atterberg.

Las razones de la diferencia entre los límites de asentamiento y de Atterberg, se pueden explicar de la misma forma que en el caso del límite de cohesión: Si existe un agregado de partículas, unas más finas que otras, los vacíos en una partícula gruesa (dentro de ella) son menores que los generados por la misma masa de partículas más pequeñas, esto genera que al agregar humedad al total del agregado de partículas, la humedad se distribuye preferencialmente entre las partículas más finas (puesto que hay más vacíos a su alrededor), lo que podría generar que la humedad local de las partículas finas sea mayor a la humedad total del agregado.

## 5.6 ENVOLVENTES MOHR-COULOMB

Si se utiliza los resultados obtenidos de compresiones no confinadas para calcular cohesión, y además los ángulos de fricción residuales para cada muestra en la Tabla 21 (que clasifican como arena-grava según la tabla 4), se puede construir envolventes de falla de Mohr-Coulomb según la ecuación (16).

A modo de ejemplo se muestra la envolvente Mohr-Coulomb para una compactación inicial y saturación medias para las tres muestras en el Gráfico 29. No se considera necesario mostrar todas las envolventes que se pueden obtener con las cohesiones obtenidas, puesto que se trata de muchos casos y quedan definidos por los resultados de cohesión, ángulo de fricción y la ecuación (16). Para este caso en particular es notoria la semejanza entre las curvas, debido a la semejanza entre ángulos de fricción y cohesiones en esas condiciones.

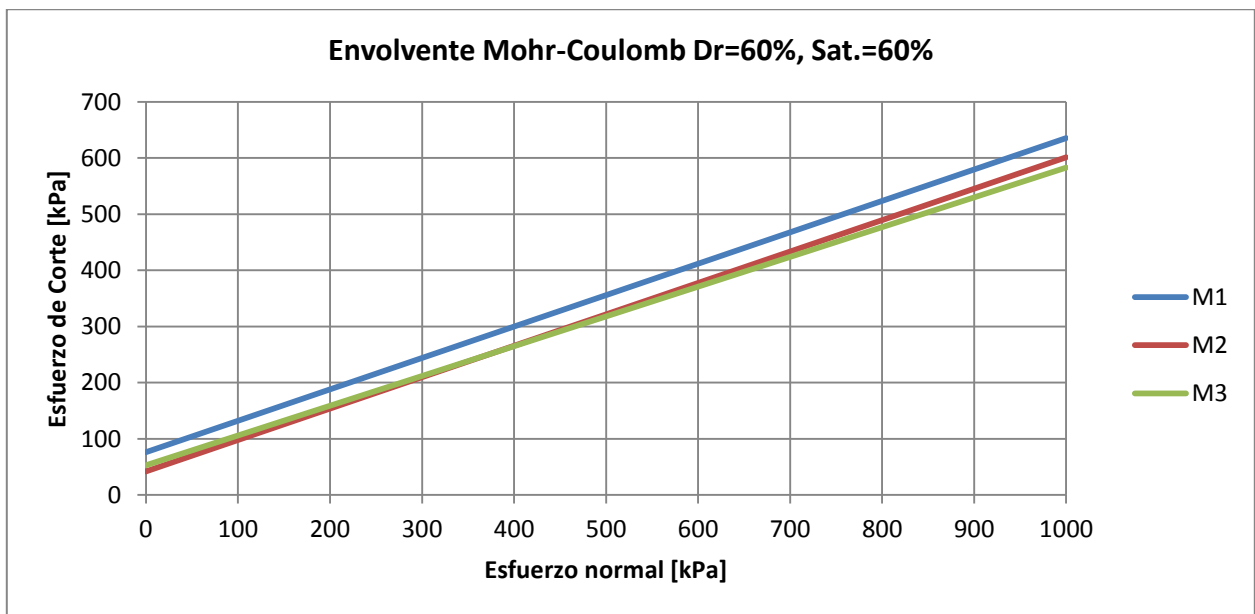


Gráfico 29: Envolventes Mohr-Coulomb para condición  $Dr=60\%$  y  $Sat.=60\%$

## 5.7 CONSOLIDACIÓN

Si se comparan los índices de la Tabla 22 y la Tabla 23, con los de valores típicos de revisión bibliográfica en la Tabla 6, se puede despejar que según el índice de consolidación:

- Muestras 1 y 3 corresponden a arcillas de plasticidad media baja.
- Muestra 2 corresponde a limos de baja plasticidad.

Por otra parte, el índice de compresión indica limos o arcillas de plasticidad alta a baja.

Estos resultados no tienen mucha relación con la clasificación obtenida, esto se debe a que el ensayo se realiza a una proporción demasiado baja de las muestras (Tabla 25) y estas no pueden ser consideradas como en caso de sobre tamaños flotantes si se quisiera utilizar el modelo de la matriz. La porción utilizada en este ensayo, no permite concluir acerca de las muestras, puesto que no las representa.

## 5.8 RESUMEN DE CARACTERIZACIÓN

A continuación en la Tabla 33 se presenta un resumen de la caracterización.

Tabla 33: Resumen de caracterización geotécnica

| Propiedad o Característica               | Método de obtención                | Resultados                          |                                      |                                     |
|------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
|                                          |                                    | Muestra 1                           | Muestra 2                            | Muestra 3                           |
| <b>Humedad</b>                           | Secado en horno (ASTM)             | 9,50%                               | 13,40%                               | 12,50%                              |
| <b>Granulometría</b>                     | Tamizaje (ASTM)                    | D60=11,35mm                         | D60=3,907mm                          | D60=12,288mm                        |
|                                          |                                    | D30=2,385mm                         | D30=0,243mm                          | D30=1,045mm                         |
|                                          |                                    | D10=0,043mm                         | D10=0,006mm                          | D10=0,018mm                         |
| <b>Límites de Atterberg</b>              | Método de Casagrande (ASTM)        | LL=21,7%                            | LL=25,7%                             | LL=26,1%                            |
|                                          |                                    | LP=16,9%                            | LP=21,9%                             | LP=19,1%                            |
| <b>Gravedad Específica</b>               | Ponderado Finos y gruesos (ASTM)   | $G_s=2,76$                          | $G_s=2,68$                           | $G_s=2,72$                          |
| <b>Índice de vacíos máximo</b>           | Densidad mínima (ASTM)             | $e_{max}=0,9$                       | $e_{max}=1,00$                       | $e_{max}=0,92$                      |
| <b>Índice de vacíos mínimo</b>           | Proctor Modificado (ASTM)          | $e_{min}=0,26$                      | $e_{min}=0,28$                       | $e_{min}=0,22$                      |
| <b>Consolidación</b>                     | Ensayo Edométrico (ASTM)           | $C_v=0,22$<br>[m <sup>2</sup> /Año] | $C_v=382,6$<br>[m <sup>2</sup> /Año] | $C_v=1,09$<br>[m <sup>2</sup> /Año] |
|                                          |                                    | $C_c=0,249$                         | $C_c=0,174$                          | $C_c=0,271$                         |
|                                          |                                    | $C_r=0,014$                         | $C_r=0,011$                          | $C_r=0,015$                         |
| <b>Cohesión</b>                          | Compresión no Confinada (ASTM)     | LPc=14,3%                           | LPc=16,8%                            | LPc=15,1%                           |
| <b>Ángulo de fricción</b>                | Ángulo reposo sumergido            | 34°                                 | 34°                                  | 32°                                 |
| <b>Asentamiento y extensión de flujo</b> | Uso de cono de Abrams (ASTM, JSCE) | LLa=13,3                            | LLa=18,2                             | LLa=17,5                            |
|                                          |                                    | LPa=13,1                            | LPa=15,5                             | LPa=14,1                            |

## 5.9 COMPARACIÓN CON RESULTADOS IOZ

Tabla 34: Comparación de resultados de Diablo Regimiento e IOZ.

| Propiedad o Característica | Parámetro | Diablo Regimiento |       |        | IOZ   |        |        |       |       |       |
|----------------------------|-----------|-------------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
|                            |           | M1                | M2    | M3     | P6/5W | P3/5E  | P3/3E  | P3/1W | P1/2E | P1/4E |
| Humedad                    | w [%]     | 9,5               | 13,4  | 1,25   | 10,9  | 10,9   | 11,7   | 12,5  | 13,3  | 11,5  |
| Granulometría              | D60 [mm]  | 11,35             | 3,907 | 12,288 | 22,24 | 29,87  | 14,32  | 11,11 | 4,22  | 24,61 |
|                            | D30 [mm]  | 2,385             | 243   | 1,045  | 3,62  | 1,73   | 0,99   | 1,06  | 0,58  | 5,14  |
|                            | D10 [mm]  | 0,043             | 0,006 | 0,018  | 0,35  | 0,20   | 0,11   | 0,21  | 0,14  | 0,33  |
|                            | Cu        | 266               | 580   | 672    | 62,97 | 152,06 | 129,64 | 52,62 | 29,97 | 74,78 |
|                            | Cc        | 11,7              | 2,3   | 4,9    | 1,67  | 0,51   | 0,62   | 0,48  | 0,57  | 3,26  |
| Límites de Atterberg       | LL [%]    | 21,7              | 25,7  | 26,1   | 22,7  | 19,2   | 18,8   | 19,9  | -     | 19,3  |
|                            | LP [%]    | 16,9              | 21    | 19,1   | 12,7  | 16,7   | 16,4   | 15,9  | -     | 14,7  |
| Gravedad Específica        | Gs        | 2,76              | 2,68  | 2,72   | 3,46  | 3      | 2,87   | 2,89  | 2,98  | 3     |
| Índice de vacíos mínimo    | emin      | 0,26              | 0,28  | 0,22   | 0,47  | 0,24   | 0,28   | 0,31  | 0,31  | 0,28  |

A partir de la Tabla 34 se realiza una comparación de ambos estudios:

- **Granulometría:** Las muestras de diablo regimiento tienen partículas más pequeñas, además se encuentran mejor graduadas que las de IOZ.
- **Límites de Atterberg:** en general los límites de Diablo Regimiento son más altos que los de IOZ, excepto con la muestra con límites más altos de IOZ (P6/5W) que coincide con la de límites más bajos en Diablo Regimiento (Muestra 1).
- **Gravedad específica:** Es menor para todas las muestras de Diablo Regimiento.
- **Índice de vacíos mínima:** Si bien aparecen valores similares en ambas minas, la variabilidad es mucho mayor en IOZ, dado principalmente por un alto valor en P6/5W.

## 6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La revisión bibliográfica indica que existen 2 mecanismos factibles para que el mineral pueda fluir como si se tratara de un líquido: Exceso de humedad y Falla Fluida.

Las propiedades de los agregados granulares como el mineral relacionado con bombeos de barro tienen propiedades particulares, como lo son la distribución granulométrica, compactación, índices de vacíos, límites de consistencia, etc. Para evaluar dichas propiedades, se han definido ciertos ensayos geotécnicos normados.

Utilizando el modelo de la matriz, se puede asumir que las propiedades de una matriz más fina controlan el comportamiento de un agregado que se compone de matriz y sobre tamaños. Esto permite utilizar los resultados de los ensayos aun cuando se haya utilizado sólo un subconjunto de tamaños en la realización de ensayos. La mayoría de los ensayos realizados satisfacen las condiciones del método de la matriz, excepto los límites de Atterberg y la consolidación.

De la caracterización de las muestras analizadas, se concluye que si bien, los minerales analizados son similares, presentan diferencias significativas en lo relativo a tamaños de partícula. La muestra 2 o muestra oxidada presenta tamaños de partícula menores que las otras, además posee límites de Atterberg líquidos y plásticos mayores a los encontrados en las muestras sulfurada y mixta.

Del análisis de ensayos de compresión no confinada y asentamiento, se concluye que la variable más importante para determinar la resistencia del mineral tipo “barro” en Diablo Regimiento es la densidad relativa. En segundo lugar se encuentra la humedad, que también se encuentra limitada por la densidad relativa o cantidad de vacíos disponibles, es por esto que se utiliza la Saturación para evaluar la resistencia en función del agua en el mineral.

A partir de un análisis simple de categorías según cohesión y asentamiento en función de la humedad, se definen límites líquidos y plásticos análogos a los límites de Atterberg pero que se definen abarcando una mayor cantidad de tamaños. Por ejemplo los límites definidos mediante el asentamiento, son válidos para la totalidad de los tamaños de partícula de las muestras de barro. Se encuentra además que estos límites se encuentran relacionados con los límites de Atterberg a pesar de que estos últimos se definan para una porción granulométrica estrecha. Esto indica que se podría utilizar los límites de Atterberg para predecir el comportamiento frente a la presencia de agua de minerales similares los evaluados en este trabajo.

La caracterización de Barro de IOZ, Freeport (Call & Nicholas, et al., 1998) es importante en este estudio, puesto que las reglas de operación actuales en El Teniente se basan indirectamente en este estudio. El estudio entrega sus recomendaciones en base al historial de bombeos y escurrimientos de la mina (20% bajo 2mm), y en la suposición de una densidad dentro de la batea medida desde la pila de mineral en el punto de extracción, lo cual podría inducir a errores. En Diablo Regimiento no se ha llevado registro de granulometrías detalladas de los bombeos y/o derrames. Tampoco se conoce la densidad relativa dentro de la batea. Además, el mineral de Diablo Regimiento muestra ser distinto al de IOZ en tres aspectos:

- El porcentaje de finos bajo 75 micrones (Limos y arcillas) en el mineral de Diablo Regimiento, es sustantivamente mayor al de IOZ.
- Los límites de Atterberg de IOZ son menores los del Mineral de diablo Regimiento, lo que indicaría que el mineral de Diablo Regimiento es menos susceptible a fluir que el de IOZ ante la misma humedad.
- La gravedad específica del mineral de Diablo Regimiento es menor a la de IOZ, lo que indicaría un menor nivel de esfuerzos debidos al peso del mineral dentro de las bateas de Diablo Regimiento que de IOZ.

Se recomienda revisar la matriz de criticidad, si es posible actualizarla al mineral presente en El Teniente, y considerar la posibilidad de utilizar distintos criterios para distintos minerales dentro de la mina. La caracterización presentada en este trabajo muestra diferencias entre los distintos minerales, principalmente frente al comportamiento en función de la humedad (límites líquidos y plásticos) y a los rangos de densidad que pueden ser adoptados por el mismo (Densidad máxima, mínima) lo que tiene consecuencias en su comportamiento mecánico.

Este estudio ha mostrado las condiciones de exceso de humedad y compactación en las que el mineral puede fluir sin confinamiento, sin embargo ha quedado pendiente la evaluación de la posibilidad de desarrollar falla fluida producto de cambios en el régimen de esfuerzos dentro de las bateas. Para esto es necesario realizar una campaña de ensayos triaxiales, que tome en cuenta los diferentes estados de compactación inicial, y las perturbaciones que pueden darse en la operación de la mina.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

1. A. Henderson, M. R., 2005. Basic Mine Fill Materials. En: *Handbook on Mine fill*. s.l.:s.n.
2. ASTM 143/C 143M-03, s.f. *Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. s.l.:s.n.
3. ASTM C127-01, s.f. *Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. s.l.:s.n.
4. ASTM D1557-02, s.f. *Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort*. s.l.:s.n.
5. ASTM D2216-98, s.f. *Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock Mass*. s.l.:s.n.
6. ASTM D2435-03, s.f. *One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*. s.l.:s.n.
7. ASTM D2487-00, s.f. *Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. s.l.:s.n.
8. ASTM D4254-00, s.f. *Minimum Index Density Weight of Soils and Calculation of Relative Density*. s.l.:s.n.
9. ASTM D4318-00, s.f. *Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*. s.l.:s.n.
10. ASTM D6913-04, s.f. *Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*. s.l.:s.n.
11. ASTM D854-02, s.f. *Specific Gravity Soil Solids by Water pycnometer*. s.l.:s.n.
12. Becerra, C., 2011. *Controlling drawpoints prone to pumping, El Teniente Mine*. s.l., s.n.
13. Butcher, R., Joughin, W. & Stacey, T. R., 2000. A Booklet on methods of combating mudrushes in diamond and base metal mines. *Simrac*.
14. Butcher, R., Stacey, T. & Joughin, W., 2005. Mud rushes and methods of combating them. *The journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp. 807-824.
15. Call & Nicholas, I., Freeport McMoRan Copper and Gold, C. & Hydrologic Consultants, I., 1998. *IOZ Wet Muck Study*, s.l.: s.n.
16. Codelco DET, 2013. *Reunión proyecto Mudflow*. s.l., s.n.
17. Diabolo Regimiento, E. T., 2013. *Visita a terreno*. s.l., s.n.
18. Fragaszy, R. J., Su, J., Siddiqi, F. H. & Ho, C. L., 1992. Modeling Strengh of Sandy Gravel. *Journal og Geotechnical Engineering*.
19. Fragaszy, R. J., Su, W. & Siddiqi, F. H., 1990. *Effects of Oversize Particles on the Density of Clean Granular*. s.l.:s.n.
20. Head, K. H., 1994. *Manual of Soil Laboratory Testing*. New York - Toronto: John Wiley & Sons.



21. Jakubec, J., Clayton, R. & Guest, A., 2012. Mudush Risk Evaluation. *Massmin*.
22. Lambe, W. & Whitman, R., 1979. Soil Mechanics. En: *Soil Mechanics*. s.l.:s.n.
23. Santamarina, C. & Cho, G. C., 2001. Determination of Critical Parameters in Sandy Soils - Simple
24. Tapia, C., 2011. *Definition of potential mudflow from drawpoints at Rio Blanco underground mine*. s.l., s.n.
25. Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. New York, London: John Wiley and sons, Inc.

## 8 ANEXOS

### 8.1 HUMEDAD NATURAL

Tabla 35: Datos humedad Muestra 1

| Paila           | Paila + mineral húmedo [gr] | Paila + mineral seco [gr] | Paila [gr] | Sólido [gr] | Agua [gr] | Humedad [%] |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|------------|-------------|-----------|-------------|
| 1               | 25838                       | 23776                     | 1522       | 22254       | 2062      | 9.3%        |
| 2               | 24830                       | 22868                     | 1640       | 21228       | 1962      | 9.2%        |
| 3               | 25960                       | 23852                     | 1710       | 22142       | 2108      | 9.5%        |
| 4               | 27060                       | 25032                     | 1986       | 23046       | 2028      | 8.8%        |
| 5               | 29032                       | 26654                     | 2032       | 24622       | 2378      | 9.7%        |
| 6               | 27284                       | 25108                     | 2126       | 22982       | 2176      | 9.5%        |
| 7               | 28530                       | 26218                     | 2010       | 24208       | 2312      | 9.6%        |
| 8               | 28534                       | 26256                     | 2214       | 24042       | 2278      | 9.5%        |
| 9               | 27544                       | 25278                     | 2088       | 23190       | 2266      | 9.8%        |
| 10              | 26664                       | 24508                     | 1714       | 22794       | 2156      | 9.5%        |
| 11              | 24236                       | 22226                     | 1582       | 20644       | 2010      | 9.7%        |
| 12              | 9490                        | 8810                      | 2024       | 6786        | 680       | 10.0%       |
| <b>Promedio</b> | 25417                       | 23382                     | 1887       | 21495       | 2035      | <b>9.5%</b> |
|                 |                             |                           |            |             | Desv      | 0.3%        |

Tabla 36: Datos humedad Muestra 2

| Paila           | Paila + mineral húmedo [gr] | Paila + mineral seco [gr] | Paila [gr] | Sólido [gr] | Agua [gr] | Humedad [%]  |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|------------|-------------|-----------|--------------|
| 1               | 22826                       | 20450                     | 1710       | 18740       | 2376      | 12.7%        |
| 2               | 20460                       | 18358                     | 2124       | 16234       | 2102      | 12.9%        |
| 3               | 11742                       | 10640                     | 2100       | 8540        | 1102      | 12.9%        |
| 4               | 21506                       | 19226                     | 2088       | 17138       | 2280      | 13.3%        |
| 5               | 28430                       | 25300                     | 2030       | 23270       | 3130      | 13.5%        |
| 6               | 19842                       | 17698                     | 2036       | 15662       | 2144      | 13.7%        |
| 7               | 24994                       | 22204                     | 2264       | 19940       | 2790      | 14.0%        |
| 8               | 23980                       | 21256                     | 2092       | 19164       | 2724      | 14.2%        |
| 9               | 24792                       | 22050                     | 2030       | 20020       | 2742      | 13.7%        |
| 10              | 25430                       | 22534                     | 2110       | 20424       | 2896      | 14.2%        |
| 11              | 24806                       | 22228                     | 2238       | 19990       | 2578      | 12.9%        |
| 12              | 25768                       | 23044                     | 2022       | 21022       | 2724      | 13.0%        |
| 13              | 24632                       | 21946                     | 2212       | 19734       | 2686      | 13.6%        |
| 14              | 21770                       | 19446                     | 2016       | 17430       | 2324      | 13.3%        |
| <b>Promedio</b> | 22927                       | 20456                     | 2077       | 18379       | 2471      | <b>13.4%</b> |
|                 |                             |                           |            |             | Desv      | 0.5%         |

Tabla 37: Datos humedad Muestra 3

| Paila           | Paila + mineral húmedo [gr] | Paila + mineral seco [gr] | Paila [gr] | Sólido [gr] | Agua [gr]           | Humedad [%]  |
|-----------------|-----------------------------|---------------------------|------------|-------------|---------------------|--------------|
| 1               | 29950                       | 26866                     | 2004       | 24862       | 3084                | 12,4%        |
| 2               | 29070                       | 26206                     | 1718       | 24488       | 2864                | 11,7%        |
| 3               | 29502                       | 26484                     | 1622       | 24862       | 3018                | 12,1%        |
| 4               | 29184                       | 26422                     | 1698       | 24724       | 2762                | 11,2%        |
| 5               | 29208                       | 26472                     | 1960       | 24512       | 2736                | 11,2%        |
| 6               | 29850                       | 26794                     | 2058       | 24736       | 3056                | 12,4%        |
| 7               | 29868                       | 26400                     | 2018       | 24382       | 3468                | 14,2%        |
| 8               | 20938                       | 18516                     | 2136       | 16380       | 2422                | 14,8%        |
| <b>Promedio</b> | 28446                       | 25520                     | 1902       | 23618       | 2926                | <b>12,5%</b> |
|                 |                             |                           |            |             | Desviación Estándar | 1,3%         |

## 8.2 GRANULOMETRÍA

Tabla 38: Datos granulometría muestra 1

| Malla   | Diámetro malla [mm] | Peso Mineral [g] | % retenido | % que pasa |
|---------|---------------------|------------------|------------|------------|
| 3''     | 75                  |                  | 0%         | 100.0%     |
| 2 1/2'' | 63                  | 0                | 0.0%       | 100.0%     |
| 2''     | 50                  | 484              | 2.0%       | 98.0%      |
| 1 1/2'' | 37.5                | 952              | 4.0%       | 94.0%      |
| 1''     | 25                  | 2706             | 11.2%      | 82.8%      |
| 3/4''   | 19                  | 2116             | 8.8%       | 74.0%      |
| 1/2''   | 12.5                | 2714             | 11.3%      | 62.7%      |
| 3/8''   | 9.5                 | 1874             | 7.8%       | 55.0%      |
| 4       | 4.75                | 223.09           | 15.2%      | 39.8%      |
| 8       | 2.36                | 146.2            | 9.9%       | 29.8%      |
| 10      | 2                   | 32.89            | 2.2%       | 27.6%      |
| 30      | 0.6                 | 124.66           | 8.5%       | 19.1%      |
| 40      | 0.425               | 25.31            | 1.7%       | 17.4%      |
| 50      | 0.3                 | 21.61            | 1.5%       | 15.9%      |
| 100     | 0.15                | 36.09            | 2.5%       | 13.5%      |
| 200     | 0.075               | 29.32            | 2.0%       | 11.5%      |
| <200    | 0.001               | 169.07           | 11.5%      | 0.0%       |

Tabla 39: Datos granulometría muestra 2

| Malla   | Diámetro malla [mm] | Peso Mineral [g] | % retenido | % que pasa |
|---------|---------------------|------------------|------------|------------|
| 3''     |                     |                  |            |            |
| 2 1/2'' | 63                  | 0                | 0.0%       | 100.0%     |
| 2''     | 50                  | 174              | 0.5%       | 99.5%      |

|         |       |        |       |       |
|---------|-------|--------|-------|-------|
| 1 1/2'' | 37.5  | 590    | 1.8%  | 97.7% |
| 1''     | 25    | 1232   | 3.7%  | 94.0% |
| 3/4''   | 19    | 1298   | 3.9%  | 90.0% |
| 1/2''   | 12.5  | 2868   | 8.7%  | 81.4% |
| 3/8''   | 9.5   | 2242   | 6.8%  | 74.6% |
| 4       | 4.75  | 102.68 | 11.8% | 62.8% |
| 8       | 2.36  | 88.43  | 10.1% | 52.7% |
| 10      | 2     | 19.07  | 2.2%  | 50.5% |
| 30      | 0.6   | 112.88 | 12.9% | 37.6% |
| 40      | 0.425 | 29.51  | 3.4%  | 34.2% |
| 50      | 0.3   | 24.08  | 2.8%  | 31.5% |
| 100     | 0.15  | 42.09  | 4.8%  | 26.6% |
| 200     | 0.075 | 36.18  | 4.1%  | 22.5% |
| <200    | 0.001 | 195.39 | 22.4% | 0.1%  |

Tabla 40: Datos granulometría muestra 3

| Tamiz   | Diámetro malla [mm] | Peso Mineral [g] | % retenido | % que pasa |
|---------|---------------------|------------------|------------|------------|
| 3''     | 75                  | 487              | 2%         | 98,0%      |
| 2 1/2'' | 63                  | 528              | 2,1%       | 95,9%      |
| 2''     | 50                  | 718              | 2,9%       | 93,0%      |
| 1 1/2'' | 37,5                | 1798             | 7,3%       | 85,7%      |
| 1''     | 25                  | 2518             | 10,2%      | 75,5%      |
| 3/4''   | 19                  | 1426             | 5,8%       | 69,8%      |
| 1/2''   | 12,5                | 2324             | 9,4%       | 60,4%      |
| 3/8''   | 9,5                 | 1528             | 6,2%       | 54,2%      |
| 4       | 4,75                | 94,81            | 9,4%       | 44,8%      |
| 8       | 2,36                | 82,52            | 8,2%       | 36,7%      |
| 10      | 2                   | 17               | 1,7%       | 35,0%      |
| 30      | 0,6                 | 93,47            | 9,2%       | 25,7%      |
| 40      | 0,425               | 22,55            | 2,2%       | 23,5%      |
| 50      | 0,3                 | 19,74            | 2,0%       | 21,6%      |
| 100     | 0,15                | 36,03            | 3,6%       | 18,0%      |
| 200     | 0,075               | 32,41            | 3,2%       | 14,8%      |
| <200    | 0,001               | 147,87           | 14,6%      | 0,2%       |

### 8.3 LÍMITES DE ATTERBERG

Tabla 41: Datos límite líquido muestra 1

| Cápsula                         | 82    | 45    | 80    | 26    |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Golpes (N)                      | 18    | 24    | 28    | 32    |
| Peso suelo húmedo + Cápsula [g] | 32.58 | 31.31 | 30.49 | 31.67 |
| Peso suelo seco + Cápsula [g]   | 28.82 | 27.72 | 27.19 | 28.36 |

|                     |            |            |            |            |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|
| Peso Cápsula [g]    | 12.17      | 11.36      | 11.89      | 12.4       |
| Peso suelo seco [g] | 16.65      | 16.36      | 15.3       | 15.96      |
| Peso agua [g]       | 3.76       | 3.59       | 3.3        | 3.31       |
| Humedad [%]         | 22.6%      | 21.9%      | 21.6%      | 20.7%      |
| Log(N)              | 1.25527251 | 1.38021124 | 1.44715803 | 1.50514998 |
| Regresión           | m          | n          |            |            |
|                     | -0.069305  | 0.3139008  |            |            |
| Límite Líquido [%]  | 21.7%      |            |            |            |

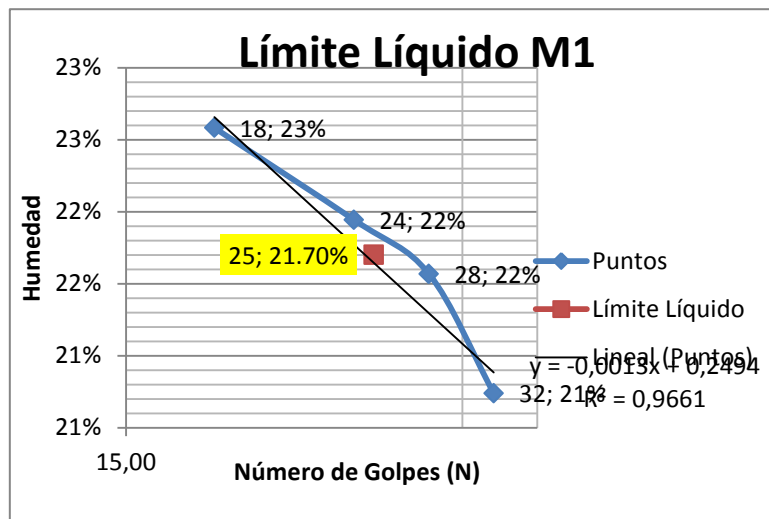


Gráfico 30: Obtención límite líquido muestra 1

Tabla 42: Datos límite plástico muestra 1

| Puntos                          | 1     | 2     |
|---------------------------------|-------|-------|
| Cápsula                         | 22    | 33    |
| Peso suelo húmedo + Cápsula [g] | 33.07 | 31.02 |
| Peso suelo seco + Cápsula [g]   | 30.02 | 28.25 |
| Peso Cápsula [g]                | 12.3  | 11.56 |
| Peso suelo seco [g]             | 17.72 | 16.69 |
| Peso agua [g]                   | 3.05  | 2.77  |
| Humedad [%]                     | 17.2% | 16.6% |
| Límite Plástico [%]             | 16.9% |       |
| Desv Estándar                   | 0.4%  |       |

Tabla 43: Datos límite líquido muestra 1

| Puntos                          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Cápsula                         | 38    | 59    | 46    | 6     | 51    |
| Golpes (N)                      | 18    | 22    | 24    | 29    | 32    |
| Peso suelo húmedo + Cápsula [g] | 34.27 | 32.35 | 33.1  | 30.8  | 33.92 |
| Peso suelo seco + Cápsula [g]   | 29.7  | 28    | 28.76 | 26.99 | 29.45 |
| Peso Cápsula [g]                | 12.35 | 11.22 | 11.93 | 11.97 | 11.63 |
| Peso suelo seco [g]             | 17.35 | 16.78 | 16.83 | 15.02 | 17.82 |

|                    |            |            |            |          |            |
|--------------------|------------|------------|------------|----------|------------|
| Peso agua [g]      | 4.57       | 4.35       | 4.34       | 3.81     | 4.47       |
| Humedad [%]        | 26.3%      | 25.9%      | 25.8%      | 25.4%    | 25.1%      |
| Log(N)             | 1.25527251 | 1.34242268 | 1.38021124 | 1.462398 | 1.50514998 |
| Regresión          | m          | n          |            |          |            |
|                    | -0.046652  | 0.3219928  |            |          |            |
| Límite Líquido [%] | 25.7%      |            |            |          |            |

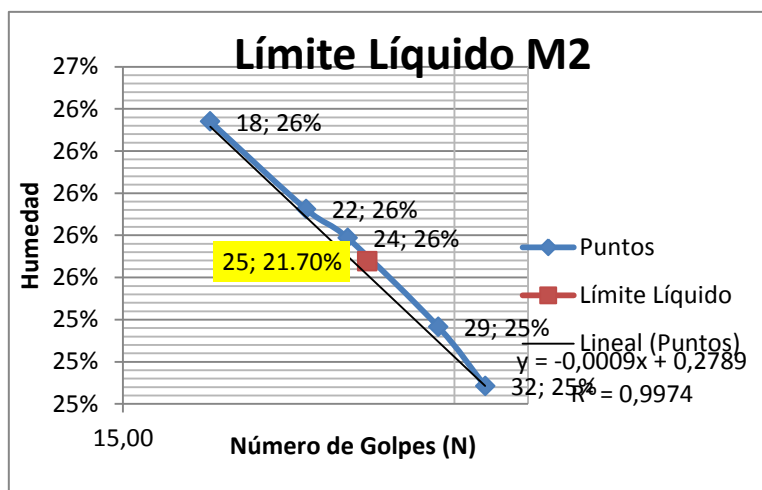


Gráfico 31: Obtención de límite líquido muestra 2

Tabla 44: datos límite plástico muestra 2

| Puntos                          | 1     | 2     |
|---------------------------------|-------|-------|
| Cápsula                         | 3     | 66    |
| Peso suelo húmedo + Cápsula [g] | 25.56 | 25.44 |
| Peso suelo seco + Cápsula [g]   | 23.19 | 22.78 |
| Peso Cápsula [g]                | 11.87 | 10.21 |
| Peso suelo seco [g]             | 11.32 | 12.57 |
| Peso agua [g]                   | 2.37  | 2.66  |
| Humedad [%]                     | 20.9% | 21.2% |
| Límite Plástico [%]             | 21.0% |       |
| Desv Estándar                   | 0.2%  |       |

Tabla 45: Datos límite líquido muestra 3

| Límite Líquido                  |       |       |       |       |       |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Puntos                          | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     |
| Cápsula                         | 12    | 48    | 55    | 56    | 67    |
| Golpes (N)                      | 19    | 21    | 24    | 29    | 31    |
| Peso suelo húmedo + Cápsula [g] | 24,64 | 21,68 | 23,97 | 25,68 | 24,43 |
| Peso suelo seco + Cápsula [g]   | 21,87 | 19,55 | 21,2  | 22,79 | 21,79 |
| Peso Cápsula [g]                | 11,85 | 11,52 | 10,57 | 11,48 | 11,35 |
| Peso suelo seco [g]             | 10,02 | 8,03  | 10,63 | 11,31 | 10,44 |
| Peso agua [g]                   | 2,77  | 2,13  | 2,77  | 2,89  | 2,64  |

|                           |              |          |       |       |       |
|---------------------------|--------------|----------|-------|-------|-------|
| <b>Humedad [%]</b>        | 27,6%        | 26,5%    | 26,1% | 25,6% | 25,3% |
| <b>Log(N)</b>             | 1,27         | 1,32     | 1,38  | 1,46  | 1,49  |
| <b>Regresión</b>          | m            | n        |       |       |       |
|                           | -0,09852     | 0,398792 |       |       |       |
| <b>Límite Líquido [%]</b> | <b>26,1%</b> |          |       |       |       |
|                           |              |          |       |       |       |

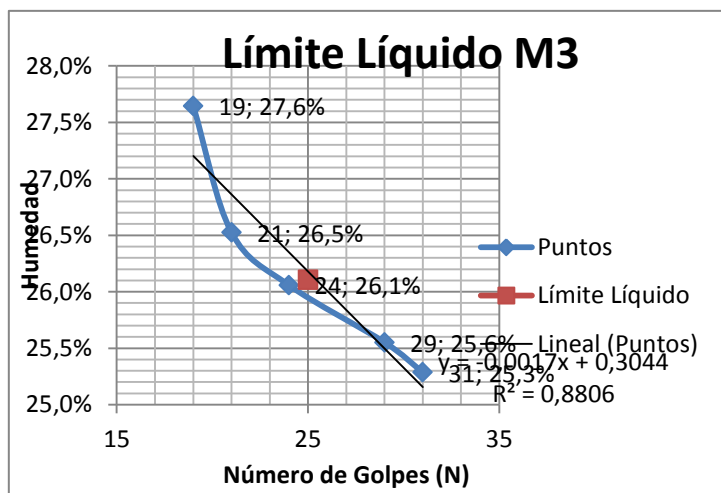


Gráfico 32: Obtención de límite líquido muestra 3

Tabla 46: Datos límite plástico muestra 3

| Límite Plástico                |              |       |
|--------------------------------|--------------|-------|
| Puntos                         | 1            | 2     |
| Cápsula                        | 26           | 64    |
| Peso sulo húmedo + Cápsula [g] | 21,4         | 17,61 |
| Peso suelo seco + Cápsula [g]  | 19,93        | 16,65 |
| Peso Cápsula [g]               | 12,39        | 11,51 |
| Peso suelo seco [g]            | 7,54         | 5,14  |
| Peso agua [g]                  | 1,47         | 0,96  |
| Humedad [%]                    | 19,5%        | 18,7% |
| <b>Límite Plástico [%]</b>     | <b>19,1%</b> |       |
| Desv Estándar                  | 0,6%         |       |

#### 8.4 GRAVEDAD ESPECÍFICA

Tabla 47: Datos gravedad específica bajo tamiz n°4, Muestra 1

| Finos (bajo 4,75mm)            | Boca ancha |        | Matraz |        |
|--------------------------------|------------|--------|--------|--------|
|                                | 4          | 5      | 3      | N514   |
| Densidad agua a 4°C [gr/cm3]   | 1          | 1      | 1      | 1      |
| Picnómetro + agua + suelo [gr] | 365.56     | 502.09 | 363.38 | 510.27 |
| Picnómetro + Agua [gr]         | 346.3      | 482.73 | 344.11 | 490.9  |
| Suelo Seco [gr]                | 30         | 30     | 30     | 30     |

|                                               |             |      |      |      |
|-----------------------------------------------|-------------|------|------|------|
| Temperatura del agua [°C]                     | 21          | 20   | 21   | 20   |
| Densidad seca del suelo [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2.79        | 2.82 | 2.80 | 2.82 |
| Gravedad específica (4°C)                     | 2.79        | 2.81 | 2.79 | 2.82 |
| Gravedad específica (4°C)                     | <b>2.80</b> |      |      |      |
| Desviación Estándar                           | <b>2%</b>   |      |      |      |

Tabla 48: Datos gravedad específica bajo tamiz n°4, Muestra 2

| Finos (bajo 4,75mm)                           | Matraz      |        |        |        |
|-----------------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|
|                                               | 1           | 3      | 4      | 5      |
| Densidad agua a 4°C [gr/cm <sup>3</sup> ]     | 1           | 1      | 1      | 1      |
| Picnómetro + agua + suelo [gr]                | 364.54      | 363    | 364.14 | 361.62 |
| Picnómetro + Agua [gr]                        | 345.54      | 343.95 | 344.55 | 342.32 |
| Suelo Seco [gr]                               | 30.41       | 30.12  | 31.52  | 30.69  |
| Temperatura del agua [°C]                     | 26          | 26     | 26     | 26     |
| Densidad seca del suelo [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2.67        | 2.72   | 2.64   | 2.69   |
| Gravedad específica (4°C)                     | 2.66        | 2.72   | 2.64   | 2.69   |
| Gravedad específica (4°C)                     | <b>2.68</b> |        |        |        |
| Desviación Estándar                           | <b>0.03</b> |        |        |        |

Tabla 49: Datos gravedad específica bajo tamiz n°4, Muestra 3

| Finos (bajo 4,75mm)                           | Matraz      |        |        |        |
|-----------------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|
|                                               | 1           | 3      | 4      | 5      |
| Densidad agua a 4°C [gr/cm <sup>3</sup> ]     | 1           | 1      | 1      | 1      |
| Picnómetro + agua + suelo [gr]                | 364,19      | 365    | 363,42 | 361,09 |
| Picnómetro + Agua [gr]                        | 345,25      | 343,49 | 344,44 | 342,09 |
| Suelo Seco [gr]                               | 30,06       | 33,74  | 30,1   | 29,92  |
| Temperatura del agua [°C]                     | 31          | 31     | 31     | 30     |
| Densidad seca del suelo [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,70        | 2,76   | 2,71   | 2,74   |
| Gravedad específica (4°C)                     | 2,70        | 2,75   | 2,70   | 2,74   |
| Gravedad específica (4°C)                     | <b>2,72</b> |        |        |        |
| Desviación Estándar                           | <b>3%</b>   |        |        |        |

Tabla 50: Datos gravedad específica sobre tamiz n°4, Muestra 1

|                                            | A       | B       | C       | D       |
|--------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Densidad agua a 4°C [gr/cm <sup>3</sup> ]  | 1       | 1       | 1       | 1       |
| Suelo seco superficialmente + capsula [gr] | 1515.54 | 1315.73 | 1165.51 | 1464.77 |
| Suelo sumergido [gr]                       | 880.95  | 767.49  | 673.47  | 867     |
| Suelo Seco + capsula [gr]                  | 1481.22 | 1286.53 | 1137.87 | 1431.76 |
| Masa cápsula                               | 92      | 73      | 78      | 72      |
| Suelo seco superficialmente [gr]           | 1424    | 1243    | 1087    | 1393    |
| Suelo Seco [gr]                            | 1390    | 1214    | 1060    | 1360    |
| Gravedad específica (4°C) OD               | 2.56    | 2.55    | 2.56    | 2.59    |



|                                   |             |      |      |      |
|-----------------------------------|-------------|------|------|------|
| Gravedad específica (4°C) OD      | <b>2.56</b> |      |      |      |
| Gravedad específica (4°C) SSD     | 2.62        | 2.61 | 2.63 | 2.65 |
| Gravedad específica (4°C) SSD     | <b>2.63</b> |      |      |      |
| Gravedad específica (4°C) Aparent | 2.73        | 2.72 | 2.74 | 2.76 |
| Gravedad específica (4°C) Aparent | <b>2.74</b> |      |      |      |

Tabla 51: Datos gravedad específica sobre tamiz n°4, Muestra 2

|                                            | A           | B      | C      | D      |
|--------------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|
| Densidad agua a 4°C [gr/cm3]               | 1           | 1      | 1      | 1      |
| Suelo seco superficialmente + capsula [gr] | 1019.17     | 902.13 | 530.1  | 937.33 |
| Suelo sumergido [gr]                       | 560.03      | 491.76 | 273.71 | 506.8  |
| Suelo Seco + capsula [gr]                  | 967.9       | 860.21 | 505.85 | 895.91 |
| Masa cápsula                               | 90          | 74     | 72     | 92     |
| Suelo seco superficialmente [gr]           | 929         | 828    | 458    | 846    |
| Suelo Seco [gr]                            | 878         | 786    | 434    | 804    |
| Gravedad específica (4°C) OD               | 2.38        | 2.34   | 2.36   | 2.37   |
| Gravedad específica (4°C) OD               | <b>2.36</b> |        |        |        |
| Gravedad específica (4°C) SSD              | 2.52        | 2.46   | 2.49   | 2.49   |
| Gravedad específica (4°C) SSD              | <b>2.49</b> |        |        |        |
| Gravedad específica (4°C) Aparent          | 2.76        | 2.67   | 2.71   | 2.70   |
| Gravedad específica (4°C) Aparent          | <b>2.71</b> |        |        |        |

Tabla 52: Datos gravedad específica sobre tamiz n°4, Muestra 3

|                                            | A           | B       | C       |
|--------------------------------------------|-------------|---------|---------|
| Densidad agua a 4°C [gr/cm3]               | 1           | 1       | 1       |
| Suelo seco superficialmente + capsula [gr] | 1126,86     | 1023,53 | 1419,82 |
| Suelo sumergido [gr]                       | 651,52      | 580,72  | 835,2   |
| Suelo Seco + capsula [gr]                  | 1093,93     | 991,88  | 1386,61 |
| Masa cápsula                               | 72          | 71      | 71      |
| Suelo seco superficialmente [gr]           | 1055        | 952     | 1349    |
| Suelo Seco [gr]                            | 1022        | 920     | 1315    |
| Gravedad específica (4°C) OD               | 2,53        | 2,48    | 2,56    |
| Gravedad específica (4°C) OD               | <b>2,53</b> |         |         |
| Gravedad específica (4°C) SSD              | 2,62        | 2,56    | 2,63    |
| Gravedad específica (4°C) SSD              | <b>2,60</b> |         |         |
| Gravedad específica (4°C) Aparent          | 2,76        | 2,71    | 2,74    |
| Gravedad específica (4°C) Aparent          | <b>2,74</b> |         |         |

Tabla 53: Datos gravedad específica bajo tamiz n°40, Muestra 1

| Finos (bajo 0.425mm)         | Matraz |   |
|------------------------------|--------|---|
|                              | 1      | 2 |
| Densidad agua a 4°C [gr/cm3] | 1      | 1 |

|                                               |             |        |
|-----------------------------------------------|-------------|--------|
| Picnómetro + agua + suelo [gr]                | 364.34      | 363.15 |
| Picnómetro + Agua [gr]                        | 345.69      | 344.04 |
| Suelo Seco [gr]                               | 30.24       | 30.37  |
| Temperatura del agua [°C]                     | 22          | 22     |
| Densidad seca del suelo [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2.61        | 2.70   |
| Gravedad específica (4°C)                     | 2.60        | 2.69   |
| Gravedad específica (4°C)                     | <b>2.65</b> |        |
| Desviación Estándar                           | <b>6%</b>   |        |

Tabla 54: Datos gravedad específica bajo tamiz n°40, Muestra 2

| Finos (bajo 0.425mm)                          | Matraz      |        |
|-----------------------------------------------|-------------|--------|
|                                               | 1           | 2      |
| Densidad agua a 4°C [gr/cm <sup>3</sup> ]     | 1           | 1      |
| Picnómetro + agua + suelo [gr]                | 364.45      | 360.99 |
| Picnómetro + Agua [gr]                        | 344.71      | 342.42 |
| Suelo Seco [gr]                               | 31.76       | 30.15  |
| Temperatura del agua [°C]                     | 23          | 22     |
| Densidad seca del suelo [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2.64        | 2.60   |
| Gravedad específica (4°C)                     | 2.64        | 2.60   |
| Gravedad específica (4°C)                     | <b>2.62</b> |        |
| Desviación Estándar                           | <b>2.7%</b> |        |

Tabla 55: Datos gravedad específica bajo tamiz n°40, Muestra 3

| Finos (bajo 0.425mm)                          | Matraz      |        |
|-----------------------------------------------|-------------|--------|
|                                               | 1           | 3      |
| Densidad agua a 4°C [gr/cm <sup>3</sup> ]     | 1           | 1      |
| Picnómetro + agua + suelo [gr]                | 366,21      | 366,29 |
| Picnómetro + Agua [gr]                        | 345,35      | 343,66 |
| Suelo Seco [gr]                               | 32,97       | 36,13  |
| Temperatura del agua [°C]                     | 28          | 27     |
| Densidad seca del suelo [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,72        | 2,68   |
| Gravedad específica (4°C)                     | 2,72        | 2,67   |
| Gravedad específica (4°C)                     | <b>2,69</b> |        |
| Desviación Estándar                           | <b>3%</b>   |        |

## 8.5 DENSIDAD MÁXIMA Y MÍNIMA

Tabla 56: Datos densidad mínima, Muestra 1

|     | Masa molde + Suelo [gr] | Masa suelo [gr]                | Dens aparente |
|-----|-------------------------|--------------------------------|---------------|
| I   | 13122                   | 4206                           | 1.48          |
| II  | 13092                   | 4176                           | 1.47          |
| III | 13154                   | 4238                           | 1.49          |
|     |                         | <b>Densidad mínima [gr/cc]</b> | <b>1.47</b>   |

Tabla 57: Datos densidad mínima, Muestra 2

|     | Masa molde + Suelo [gr] | Masa suelo [gr]         | Dens aparente |
|-----|-------------------------|-------------------------|---------------|
| I   | 12286                   | 3674                    | 1.33          |
| II  | 12340                   | 3728                    | 1.35          |
| III | 12350                   | 3738                    | 1.35          |
|     |                         | Densidad mínima [gr/cc] | <b>1.33</b>   |

Tabla 58: Datos densidad mínima, Muestra 3

|     | Masa molde + Suelo [gr] | Masa suelo [gr]         | Dens aparente |
|-----|-------------------------|-------------------------|---------------|
| I   | 12438                   | 3918                    | 1,42          |
| II  | 12406                   | 3886                    | 1,41          |
| III | 12418                   | 3898                    | 1,41          |
|     |                         | Densidad mínima [gr/cc] | <b>1,41</b>   |

Tabla 59: Datos densidad máxima, Muestra 1

|     | Masa molde + Suelo [gr] | Masa suelo [gr]         | Dens aparente |
|-----|-------------------------|-------------------------|---------------|
| I   | 14240                   | 5324                    | 1.87          |
| II  | 14268                   | 5352                    | 1.88          |
| III | 14316                   | 5400                    | 1.90          |
|     |                         | Densidad máxima [gr/cc] | <b>1.90</b>   |

Tabla 60: Datos densidad máxima, Muestra 2

|     | Masa molde + Suelo [gr] | Masa suelo [gr]         | Dens aparente |
|-----|-------------------------|-------------------------|---------------|
| I   | 13326                   | 4710                    | 1.71          |
| II  | 13264                   | 4746                    | 1.72          |
| III | 13258                   | 4740                    | 1.72          |
|     |                         | Densidad máxima [gr/cc] | <b>1.72</b>   |

Tabla 61: Datos densidad máxima, Muestra 3

|     | Masa molde + Suelo [gr] | Masa suelo [gr]         | Dens aparente |
|-----|-------------------------|-------------------------|---------------|
| I   | 13994                   | 5474                    | 1,98          |
| II  | 14012                   | 5492                    | 1,99          |
| III | 14006                   | 5486                    | 1,99          |
|     |                         | Densidad máxima [gr/cc] | <b>1,99</b>   |

## 8.6 PROCTOR MODIFICADO

Tabla 62: Datos proctor Modificado, Muestra 1

| Determinación de densidad |              |          |                      |           |               |                                  |                             |                           |
|---------------------------|--------------|----------|----------------------|-----------|---------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Molde                     | Humedad      |          | Pesos                |           |               | Volumen molde [cm <sup>3</sup> ] | Densidad                    |                           |
|                           | Aparente [%] | Real [%] | Molde + Material [g] | Molde [g] | Materia l [g] |                                  | Húmeda [g/cm <sup>3</sup> ] | Seca [g/cm <sup>3</sup> ] |
|                           |              |          |                      |           |               |                                  |                             |                           |

|   |     |           |      |      |      |         |             |             |
|---|-----|-----------|------|------|------|---------|-------------|-------------|
| 1 | 4%  | 4.4%      | 7844 | 3060 | 4784 | 2114.73 | 2.26        | 2.17        |
| 2 | 6%  | 6.4%      | 8028 | 3060 | 4968 | 2114.73 | 2.35        | 2.21        |
| 3 | 8%  | 8.3%      | 8134 | 3060 | 5074 | 2114.73 | 2.40        | 2.21        |
| 4 | 10% | 9.4%      | 8082 | 3060 | 5022 | 2114.73 | 2.37        | 2.17        |
| 5 | 12% | 11.1<br>% | 8022 | 3060 | 4962 | 2114.73 | 2.35        | 2.11        |
|   |     |           |      |      |      |         | <b>2.40</b> | <b>2.21</b> |

**Tabla 63: Datos Proctor Modificado, Muestra 2**

| <b>Determinación de densidad</b> |                     |                 |                             |                  |                      |                            |                       |                     |
|----------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
| <b>Molde</b>                     | <b>Humedad</b>      |                 | <b>Pesos</b>                |                  |                      | <b>Volumen molde [cm3]</b> | <b>Densidad</b>       |                     |
|                                  | <b>Aparente [%]</b> | <b>Real [%]</b> | <b>Molde + Material [g]</b> | <b>Molde [g]</b> | <b>Materia l [g]</b> |                            | <b>Húmeda [g/cm3]</b> | <b>Seca [g/cm3]</b> |
| 1                                | 2%                  | 2.1%            | 7238                        | 2958             | 4280                 | 2126.96                    | 2.01                  | 1.97                |
| 2                                | 4%                  | 4.1%            | 7402                        | 2958             | 4444                 | 2126.96                    | 2.09                  | 2.01                |
| 3                                | 6%                  | 5.6%            | 7454                        | 2958             | 4496                 | 2126.96                    | 2.11                  | 2.00                |
| 4                                | 8%                  | 7.6%            | 7560                        | 2958             | 4602                 | 2126.96                    | 2.16                  | 2.01                |
| 5                                | 10%                 | 9.2%            | 7746                        | 2958             | 4788                 | 2126.96                    | 2.25                  | 2.06                |
| 6                                | 12%                 | 11.2<br>%       | 7742                        | 2958             | 4784                 | 2126.96                    | 2.25                  | 2.09                |
| 7                                | 14%                 | 12.9<br>%       | 7612                        | 2958             | 4654                 | 2126.96                    | 2.19                  | 1.94                |
|                                  |                     |                 |                             |                  |                      |                            | <b>2.25</b>           | <b>2.09</b>         |

**Tabla 64: Datos Proctor Modificado, Muestra 3**

| <b>Molde</b> | <b>Humedad</b>      |                 | <b>Pesos</b>                |                  |                      | <b>Volumen molde [cm3]</b> | <b>Densidad</b>       |                     |
|--------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|------------------|----------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------|
|              | <b>Aparente [%]</b> | <b>Real [%]</b> | <b>Molde + Material [g]</b> | <b>Molde [g]</b> | <b>Materia l [g]</b> |                            | <b>Húmeda [g/cm3]</b> | <b>Seca [g/cm3]</b> |
| 1            | 4%                  | 4,5%            | 7938                        | 3142             | 4796                 | 2124,32                    | 2,26                  | 2,16                |
| 2            | 6%                  | 6,1%            | 8164                        | 3142             | 5022                 | 2124,32                    | 2,36                  | 2,23                |
| 3            | 8%                  | 8,4%            | 8246                        | 3142             | 5104                 | 2124,32                    | 2,40                  | 2,22                |
| 4            | 10%                 | 10,0<br>%       | 8122                        | 3142             | 4980                 | 2124,32                    | 2,34                  | 2,13                |
| 5            | 12%                 | 11,8<br>%       | 7990                        | 3142             | 4848                 | 2124,32                    | 2,28                  | 2,04                |
|              |                     |                 |                             |                  |                      |                            | <b>2,40</b>           | <b>2,23</b>         |

### Proctor Modificado Muestra 1

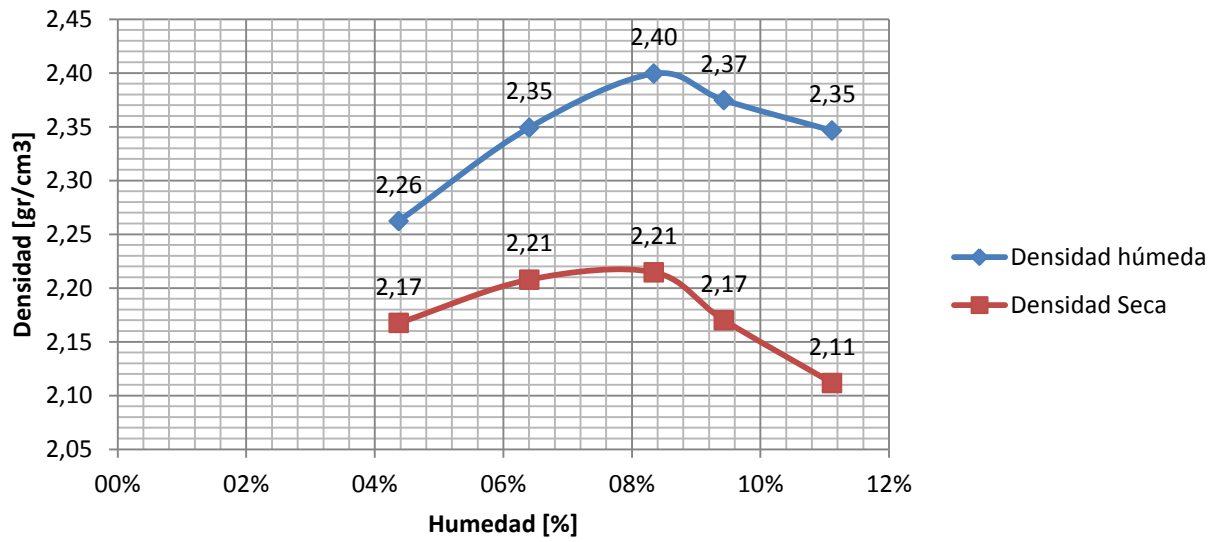


Gráfico 33: Resultados proctor, Muestra 1

### Proctor Modificado Muestra 2

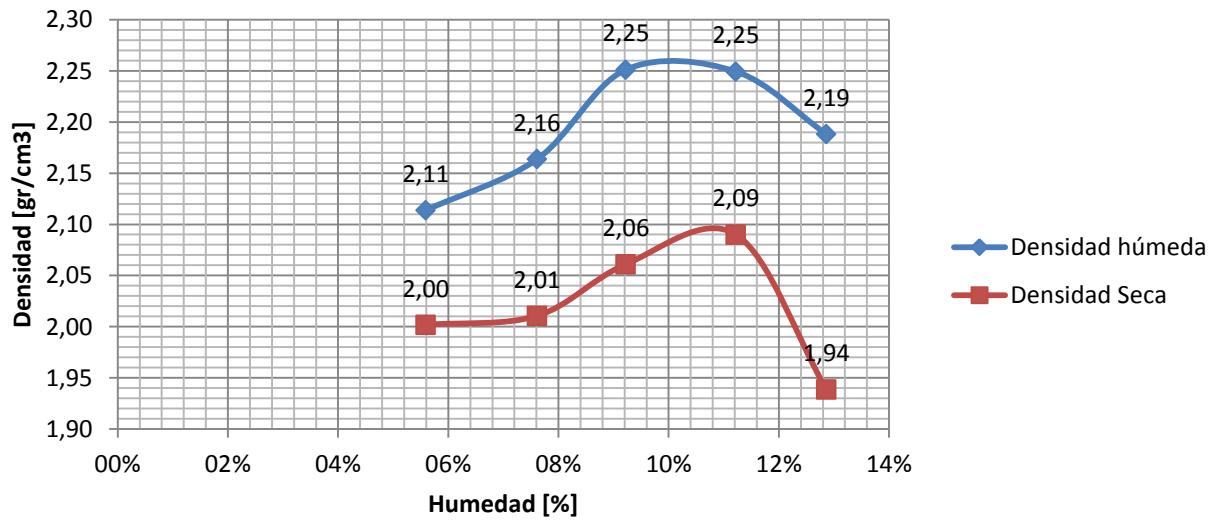


Gráfico 34: Resultados proctor, Muestra 2

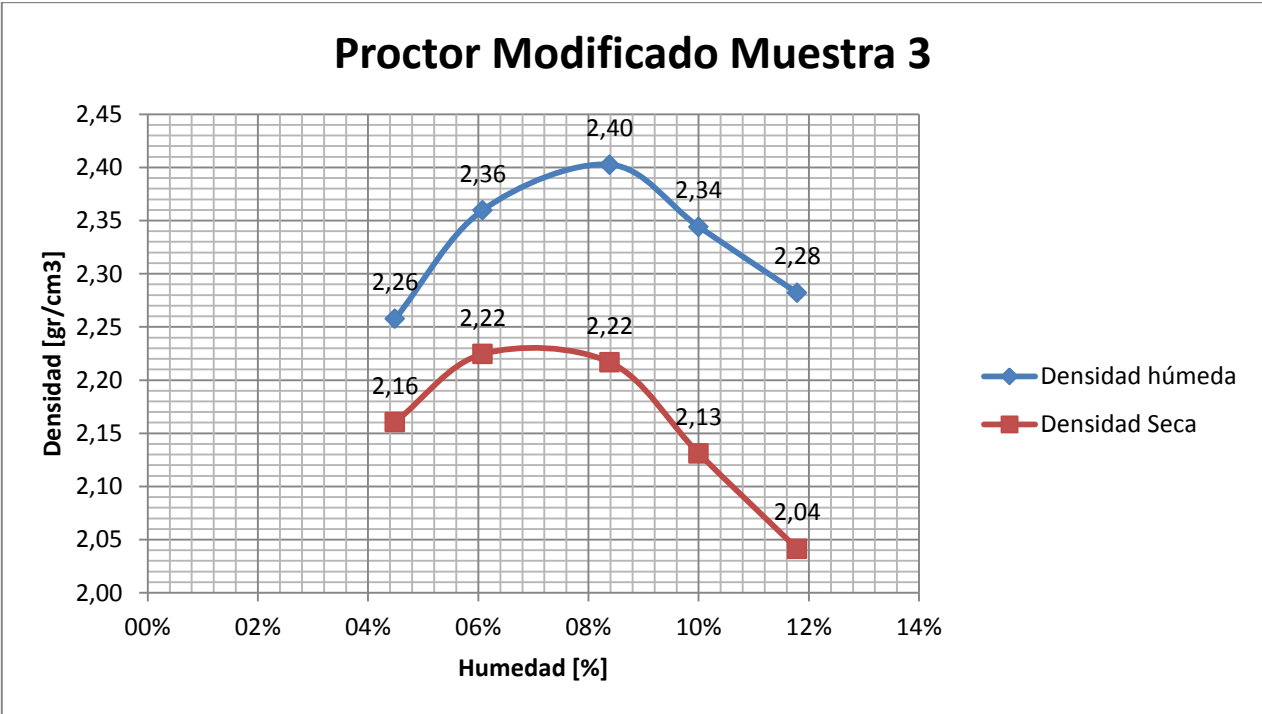


Gráfico 35: Resultados proctor, Muestra 3

**8.7 COMPRESIÓN NO CONFINADA**  
**Humedad Óptima**

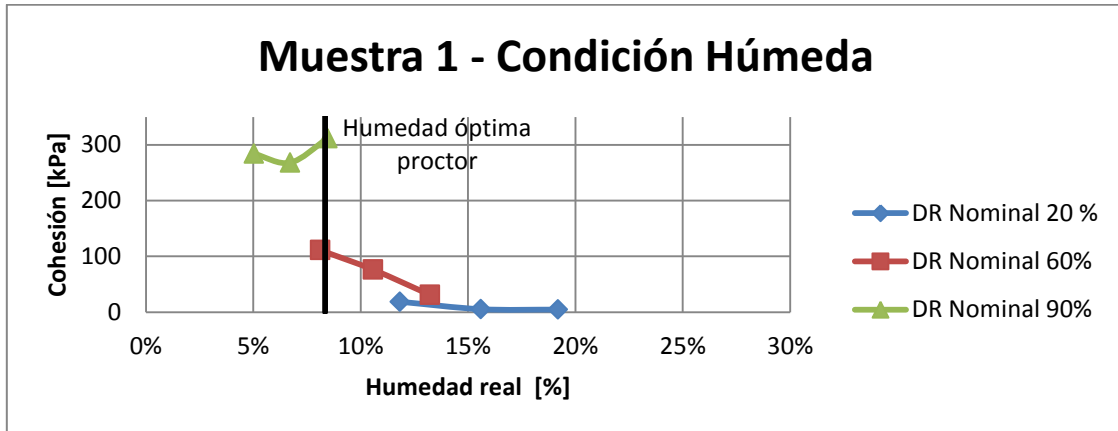


Gráfico 36: Humedad Óptima Proctor M1

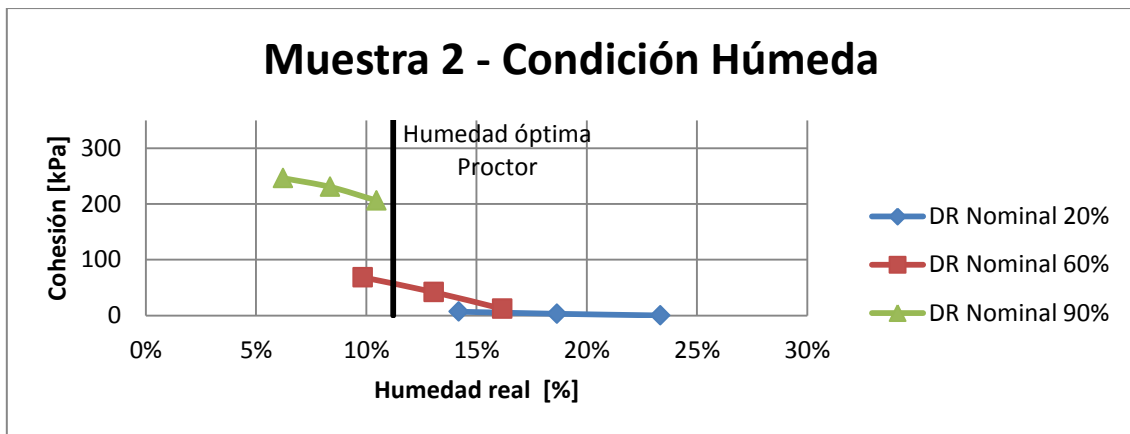


Gráfico 37: Humedad Óptima Proctor M2

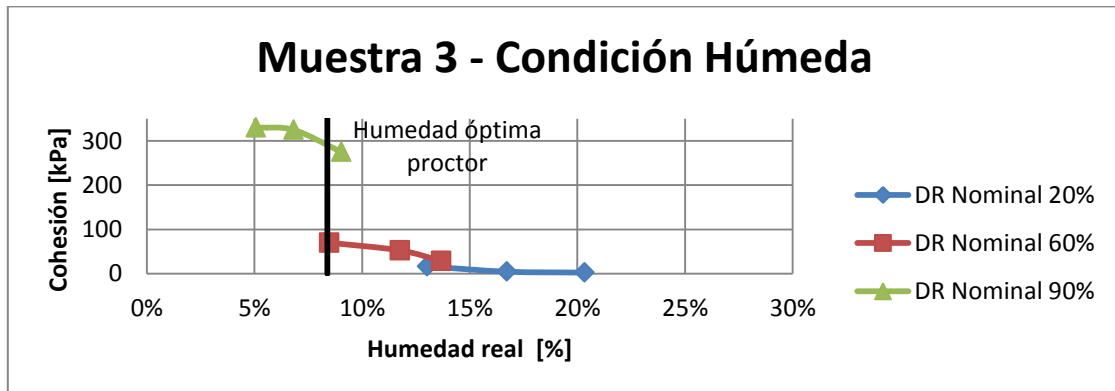


Gráfico 38: Humedad Óptima Proctor M3

## Módulo de Deformación

A continuación se muestran los valores obtenidos para el módulo de deformación de los ensayos realizados.

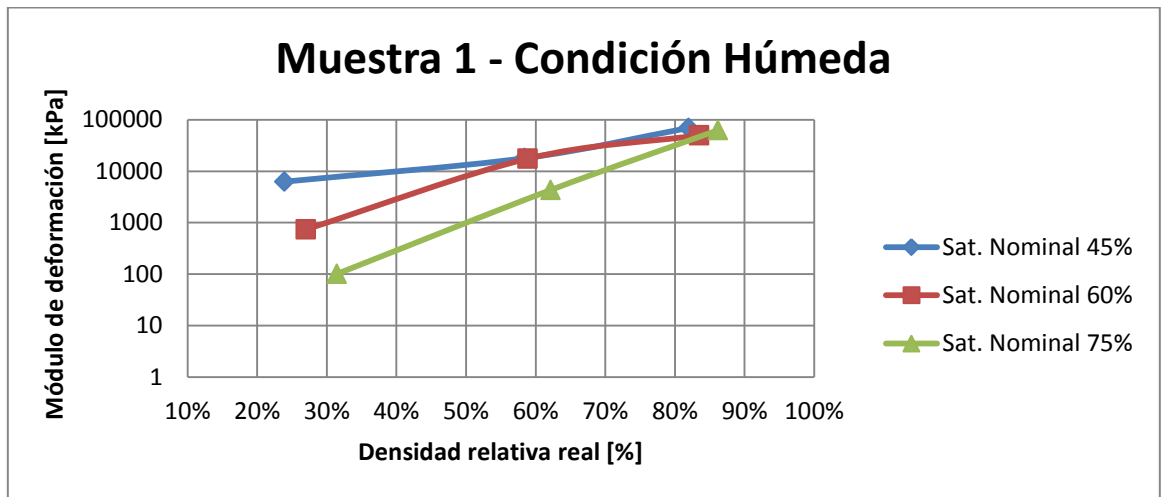


Gráfico 39: Módulo de deformación para muestra 1 condición húmeda.

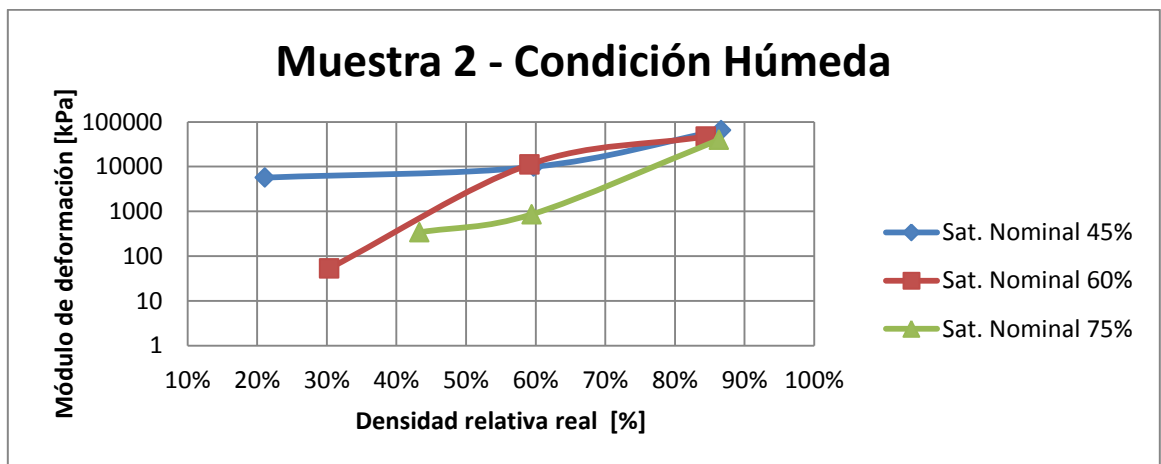


Gráfico 40: Módulo de deformación para muestra 2 condición húmeda.

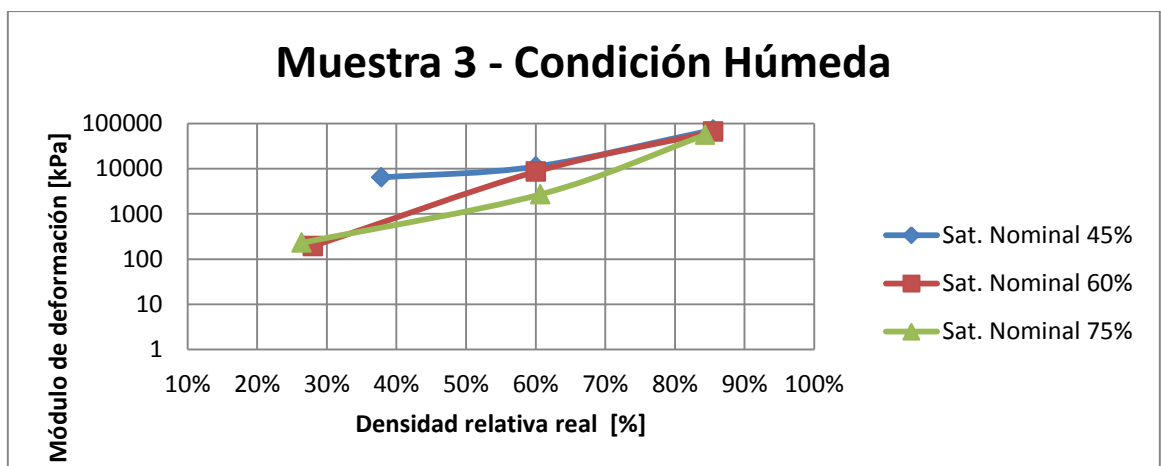


Gráfico 41: Módulo de deformación para muestra 3 condición húmeda.



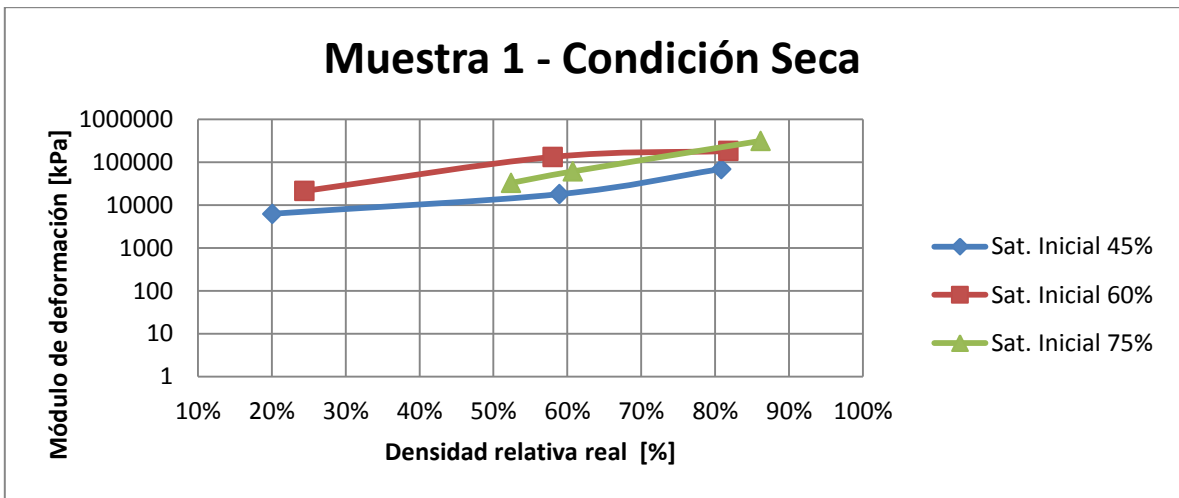


Gráfico 42: Módulo de deformación para muestra 1 condición seca.

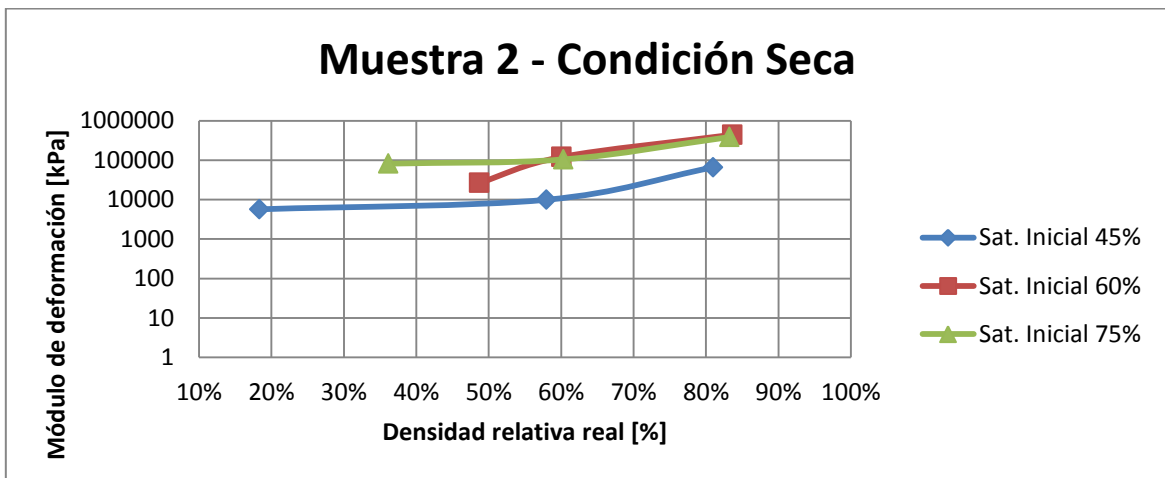


Gráfico 43: Módulo de deformación para muestra 2 condición seca.

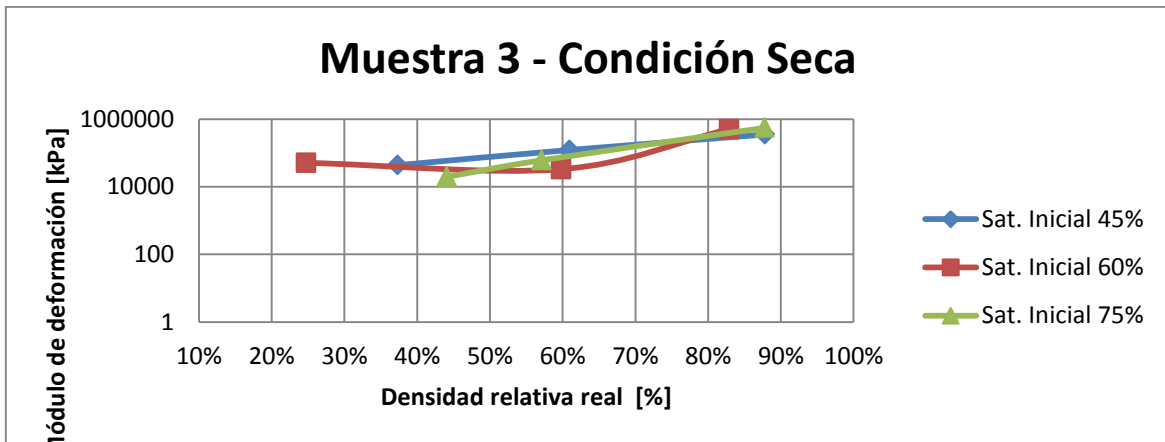


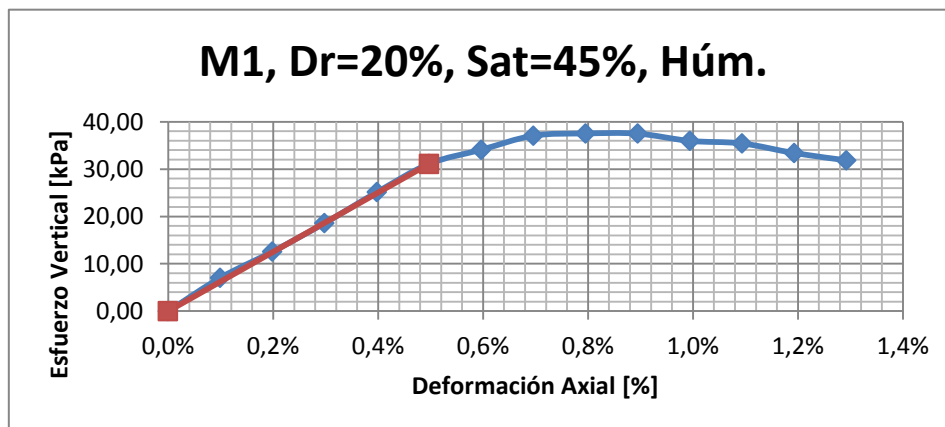
Gráfico 44: Módulo de deformación para muestra 3 condición seca.

### Datos de los ensayos

Los resultados de compresión no confinada son 54, por lo que se presenta las condiciones inicial y finales de cada ensayo junto a su gráfico esfuerzo deformación.

**Tabla 65: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

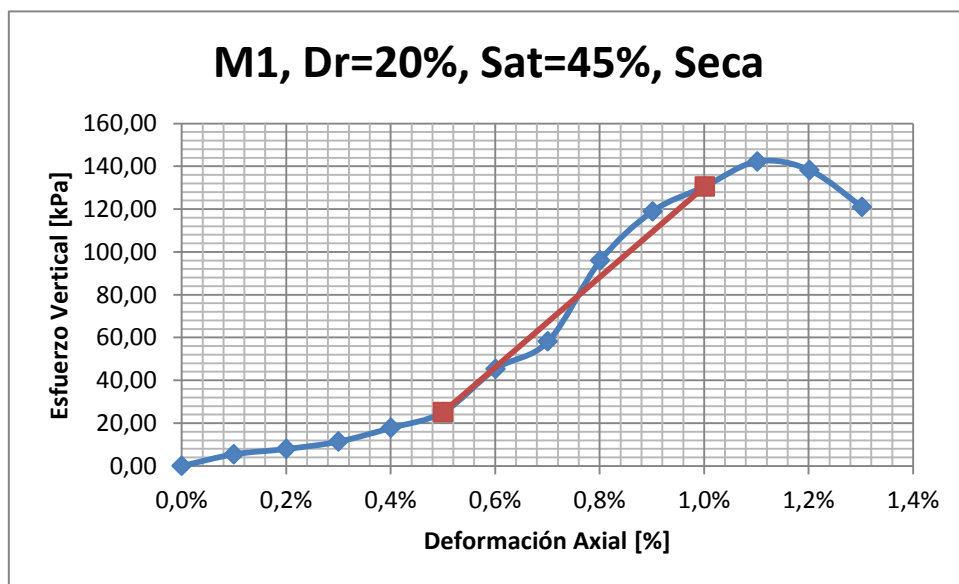
|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M1, Dr=20%, Sat=45%, Húm. |
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 348,81                    |
| w nominal [%]                              | 12,4%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 420,9                     |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 384,09                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,72                     |
| Altura [cm]                                | 10,1                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,31                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 194,29                    |
| w real [%]                                 | 11,8%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,60                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,79                      |
| e real                                     | 0,75                      |
| Dr real [%]                                | 23,9%                     |
| Sat real [%]                               | 44,2%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 6260,38                   |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 37,53                     |



**Gráfico 45: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 66: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

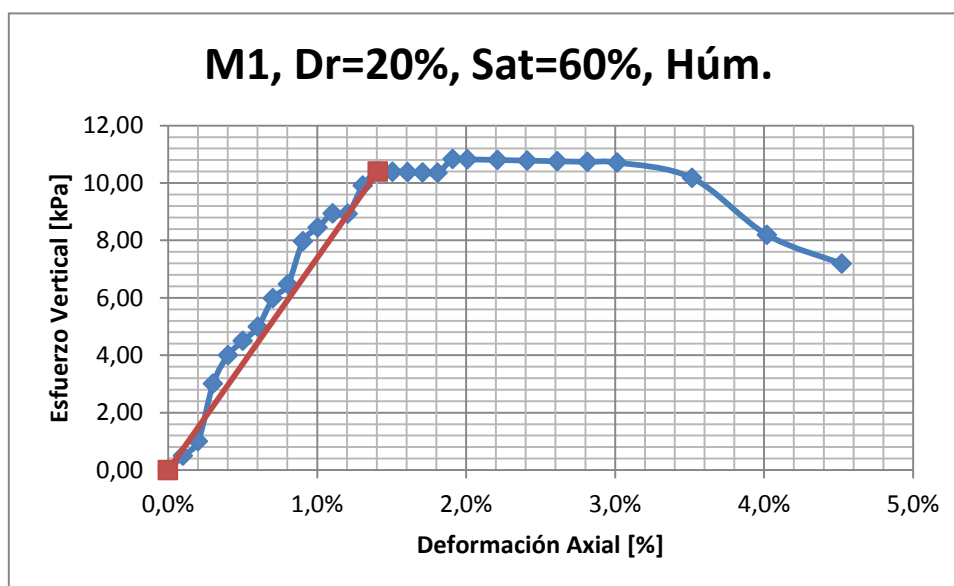
| ID probeta                                 | M1, Dr=20%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| E <sub>max</sub>                           | 0,90                      |
| E <sub>min</sub>                           | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 348,81                    |
| w nominal [%]                              | 12,4%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 442,71                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 405,96                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 96,13                     |
| Altura [cm]                                | 9,98                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 196,02                    |
| w real [%]                                 | 11,9%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,58                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,77                      |
| e real                                     | 0,77                      |
| Dr real [%]                                | 20,1%                     |
| Sat real [%]                               | 43,0%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 21058,34                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 142,29                    |



**Gráfico 46: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 67: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

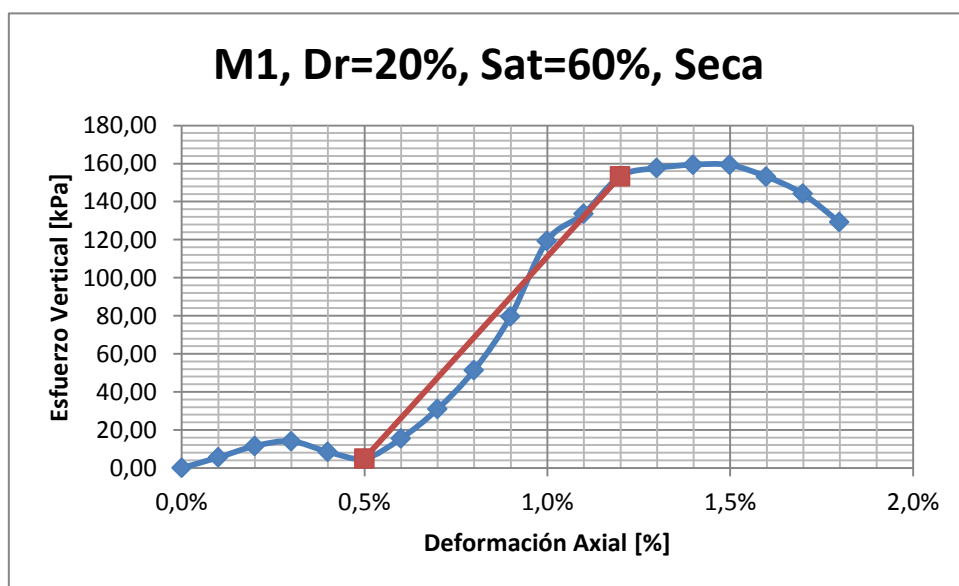
| ID probeta                                 | M1, Dr=20%, Sat=60%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 361,65                    |
| w nominal [%]                              | 16,6%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 440,31                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 391,5                     |
| Peso cápsula [gr]                          | 78,64                     |
| Altura [cm]                                | 9,95                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,40                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 193,03                    |
| w real [%]                                 | 15,6%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,62                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,87                      |
| e real                                     | 0,73                      |
| Dr real [%]                                | 27,0%                     |
| Sat real [%]                               | 60,0%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 738,86                    |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 10,84                     |



**Gráfico 47: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 68: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

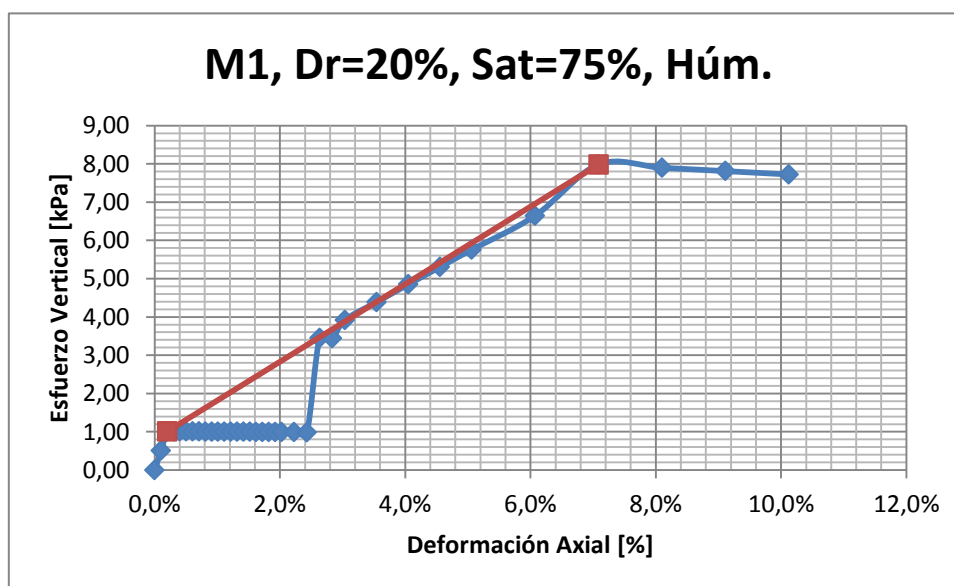
| ID probeta                                 | M1, Dr=20%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| E <sub>max</sub>                           | 0,90                      |
| E <sub>min</sub>                           | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 361,65                    |
| w nominal [%]                              | 16,6%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 470,85                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 420,95                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 109,18                    |
| Altura [cm]                                | 10,01                     |
| Diámetro [cm]                              | 4,97                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,40                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 194,19                    |
| w real [%]                                 | 16,0%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,61                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,86                      |
| e real                                     | 0,75                      |
| Dr real [%]                                | 24,4%                     |
| Sat real [%]                               | 60,2%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 21206,43                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 159,42                    |



**Gráfico 48: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 69: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

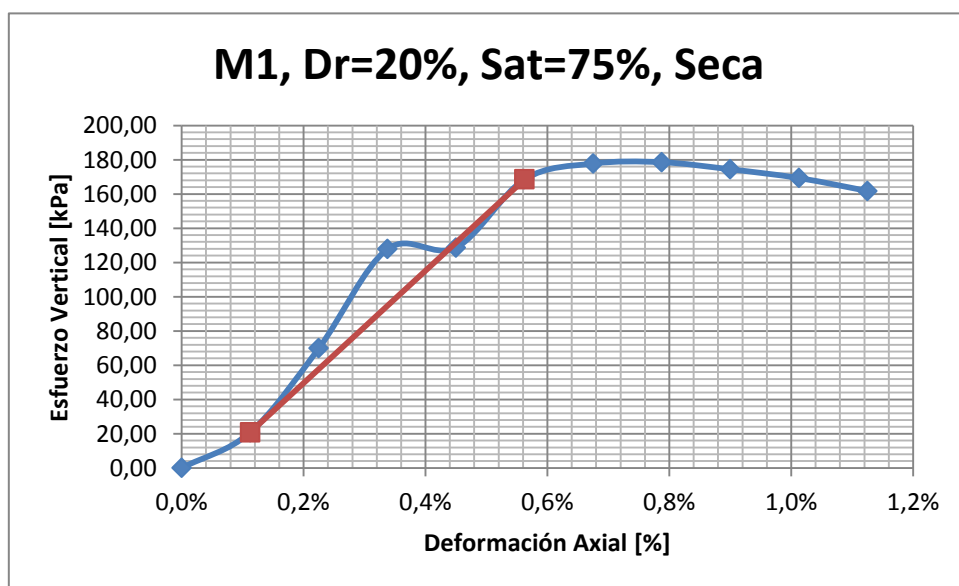
| ID probeta                                 | M1, Dr=20%, Sat=75%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 374,50                    |
| w nominal [%]                              | 21%                       |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 446,68                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 386,49                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,85                     |
| Altura [cm]                                | 9,9                       |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,27                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 190,32                    |
| w real [%]                                 | 19%                       |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,65                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,96                      |
| e real                                     | 0,70                      |
| Dr real [%]                                | 31%                       |
| Sat real [%]                               | 77%                       |
| Módulo de deformación [kPa]                | 101,31                    |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 9,33                      |



**Gráfico 49: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 70: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

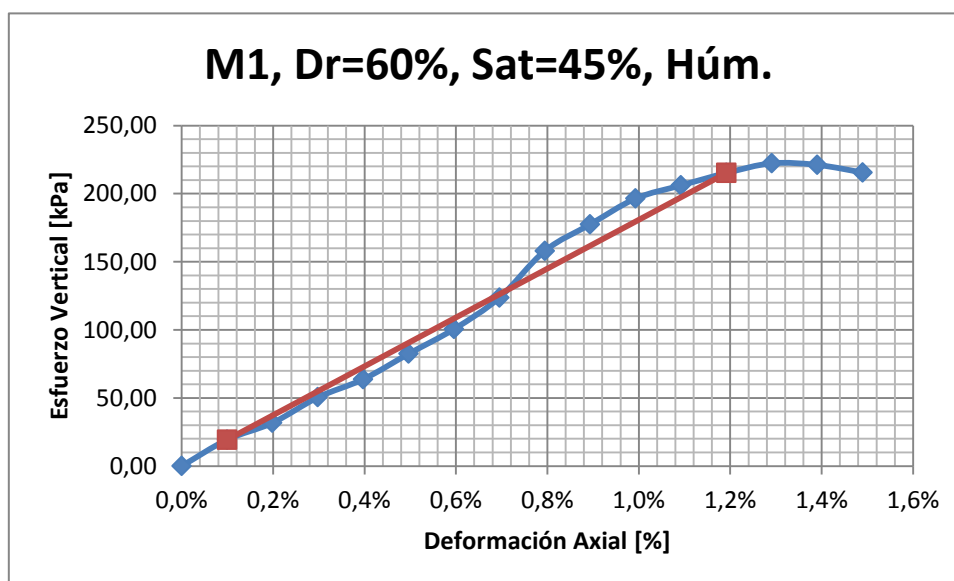
| ID probeta                                 | M1, Dr=20%, Sat=75%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| E <sub>max</sub>                           | 0,90                      |
| E <sub>min</sub>                           | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 374,50                    |
| w nominal [%]                              | 21%                       |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 444,36                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 384,85                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 73,62                     |
| Altura [cm]                                | 8,88                      |
| Diámetro [cm]                              | 4,99                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,59                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 174,10                    |
| w real [%]                                 | 19,1%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,79                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,13                      |
| e real                                     | 0,57                      |
| Dr real [%]                                | 52,4%                     |
| Sat real [%]                               | 94,4%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 32821,83                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 178,57                    |



**Gráfico 50: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 71: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

| ID probeta                                 | M1, Dr=60%, Sat=45%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 392,35                    |
| w nominal [%]                              | 8,3%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 465,37                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 435,95                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 73,64                     |
| Altura [cm]                                | 10,1                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 197,72                    |
| w real [%]                                 | 8%                        |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,83                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,98                      |
| e real                                     | 0,53                      |
| Dr real [%]                                | 58%                       |
| Sat real [%]                               | 43%                       |
| Módulo de deformación [kPa]                | 17930,63                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 222,32                    |

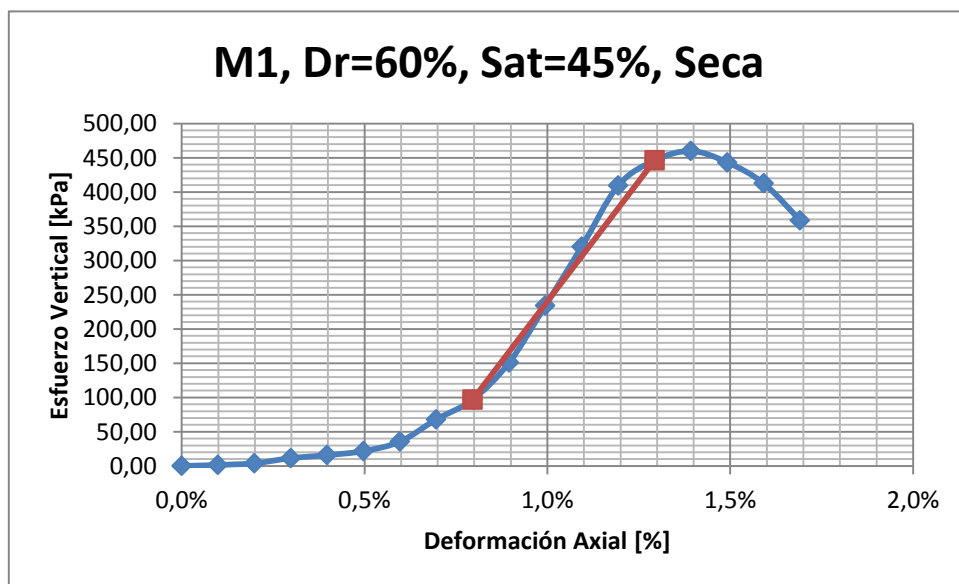


**Gráfico 51: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**



**Tabla 72:: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

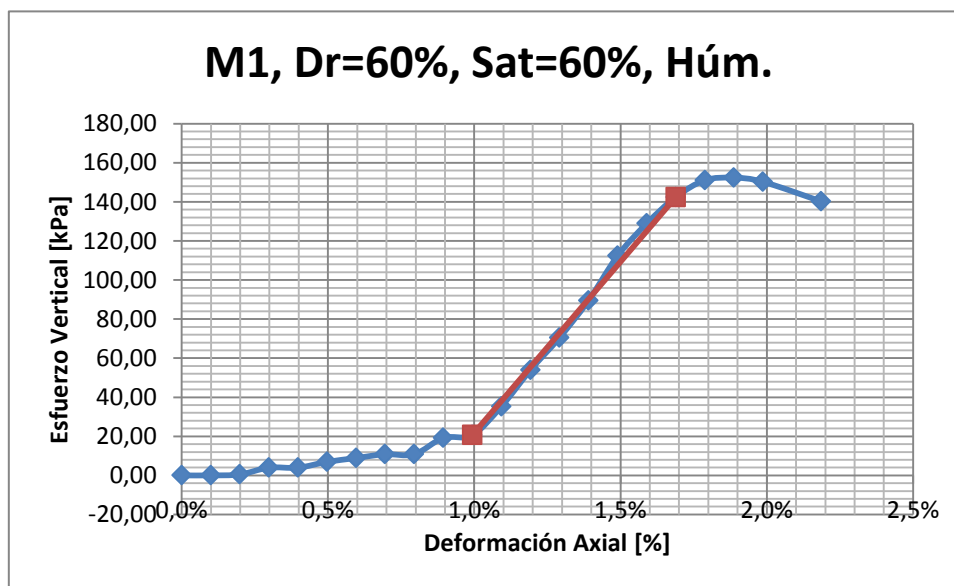
| ID probeta                                 | M1, Dr=60%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 392,35                    |
| w nominal [%]                              | 11,1%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 471,99                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 433,97                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 71,53                     |
| Altura [cm]                                | 10,05                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 197,40                    |
| w real [%]                                 | 10,5%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,84                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,03                      |
| e real                                     | 0,53                      |
| Dr real [%]                                | 58,9%                     |
| Sat real [%]                               | 55,9%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 70202,93                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 459,84                    |



**Gráfico 52: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 73: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

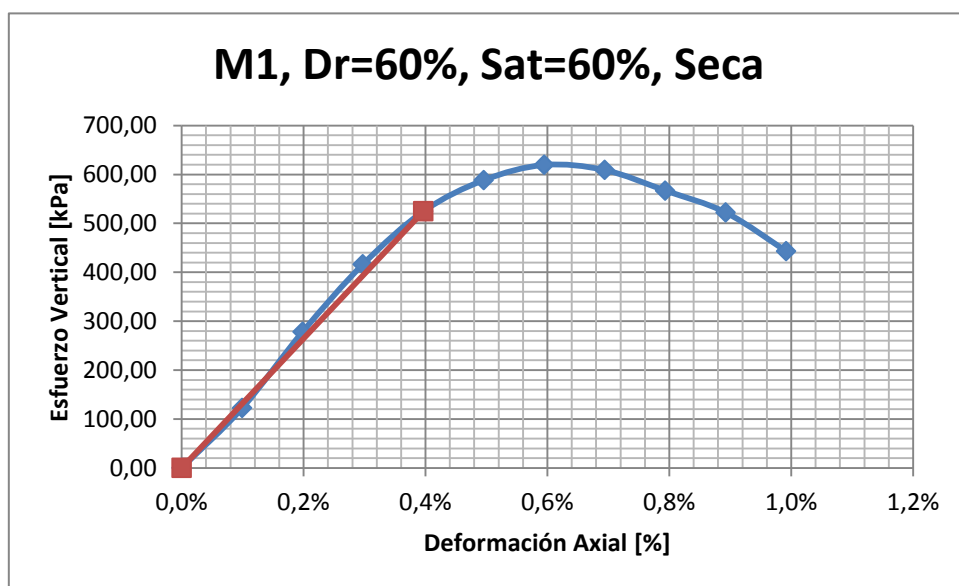
| ID probeta                                 | M1, Dr=60%, Sat=60%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 402,42                    |
| w nominal [%]                              | 11%                       |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 479,22                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 440,83                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 77,99                     |
| Altura [cm]                                | 10,1                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 197,66                    |
| w real [%]                                 | 11%                       |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,84                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,03                      |
| e real                                     | 0,53                      |
| Dr real [%]                                | 59%                       |
| Sat real [%]                               | 56%                       |
| Módulo de deformación [kPa]                | 17514,11                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 152,35                    |



**Gráfico 53: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 74: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

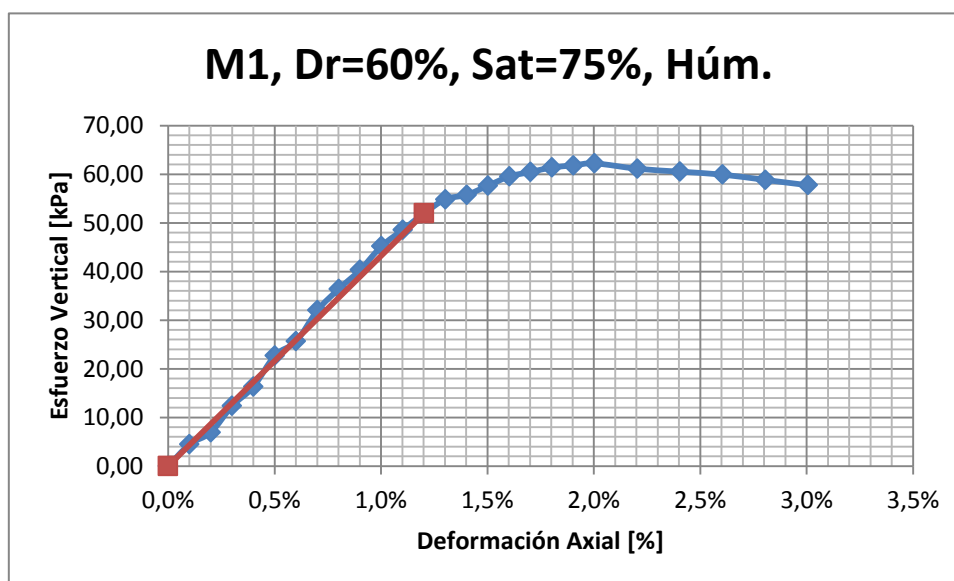
| ID probeta                                 | M1, Dr=60%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 402,42                    |
| w nominal [%]                              | 11%                       |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 474,4                     |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 434,67                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,53                     |
| Altura [cm]                                | 10,08                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 197,99                    |
| w real [%]                                 | 11,0%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,83                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,03                      |
| e real                                     | 0,53                      |
| Dr real [%]                                | 58,0%                     |
| Sat real [%]                               | 57,8%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 132286,66                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 619,40                    |



**Gráfico 54: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 75: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

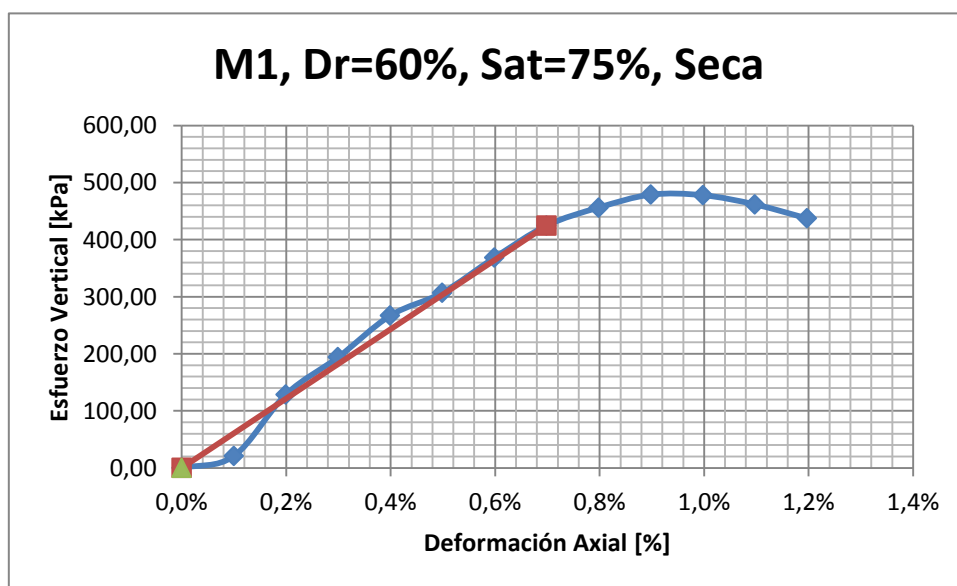
| ID probeta                                 | M1, Dr=60%, Sat=75%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 412,49                    |
| w nominal [%]                              | 14%                       |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 506,19                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 457,96                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 93,25                     |
| Altura [cm]                                | 10,0                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 195,96                    |
| w real [%]                                 | 13%                       |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,86                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,11                      |
| e real                                     | 0,51                      |
| Dr real [%]                                | 62%                       |
| Sat real [%]                               | 73%                       |
| Módulo de deformación [kPa]                | 4320,91                   |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 62,23                     |



**Gráfico 55: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 76: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

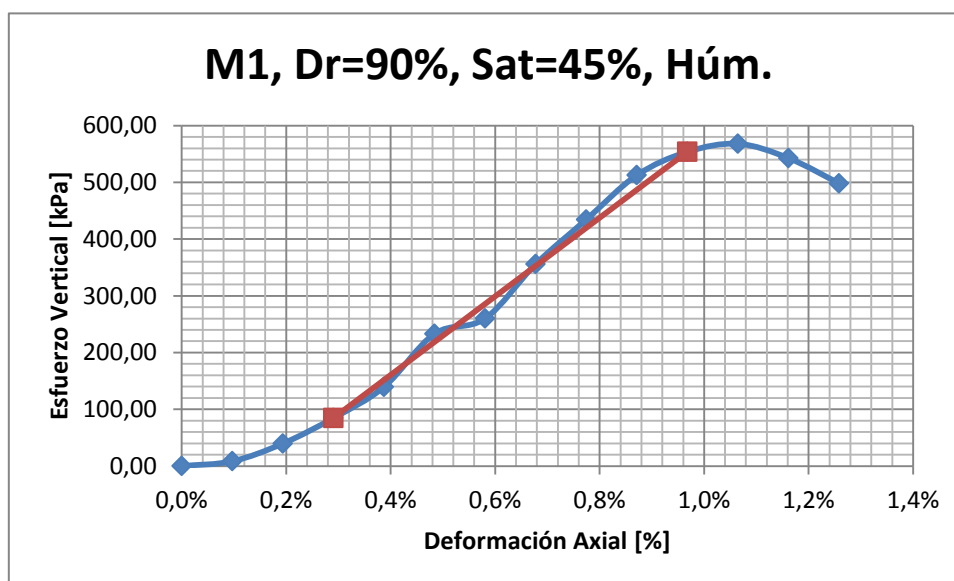
| ID probeta                                 | M1, Dr=60%, Sat=75%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 412,49                    |
| w nominal [%]                              | 14%                       |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 501,3                     |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 453,38                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 89,28                     |
| Altura [cm]                                | 10,02                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 196,81                    |
| w real [%]                                 | 13,2%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,85                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,09                      |
| e real                                     | 0,51                      |
| Dr real [%]                                | 60,7%                     |
| Sat real [%]                               | 71,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 60806,70                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 478,87                    |



**Gráfico 56: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 77: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

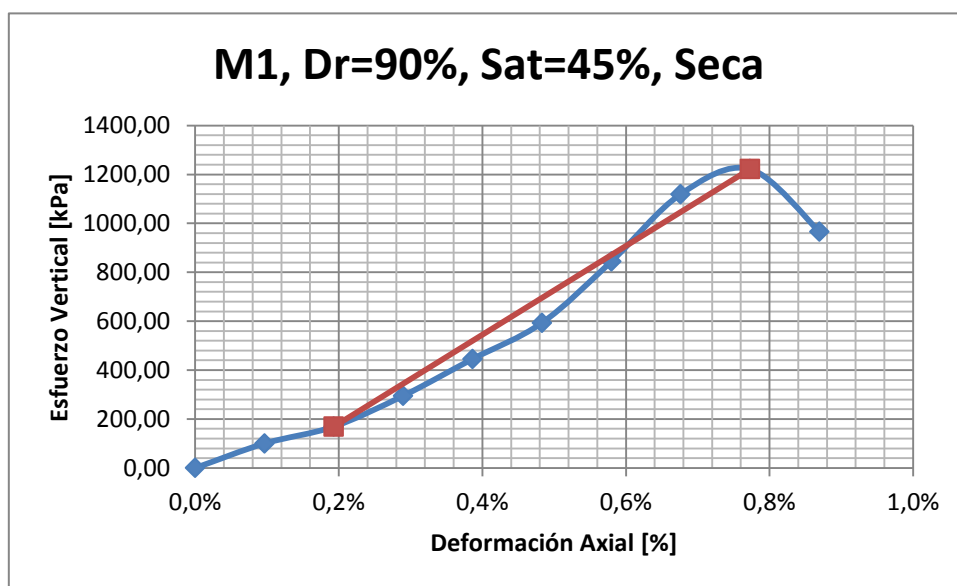
| ID probeta                                 | M1, Dr=90%, Sat=45%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 435,93                    |
| w nominal [%]                              | 5%                        |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 504,22                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 483,47                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 71,43                     |
| Altura [cm]                                | 10,3                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 202,89                    |
| w real [%]                                 | 5%                        |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,03                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,13                      |
| e real                                     | 0,38                      |
| Dr real [%]                                | 82%                       |
| Sat real [%]                               | 37%                       |
| Módulo de deformación [kPa]                | 69249,86                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 567,88                    |



**Gráfico 57: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 78: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

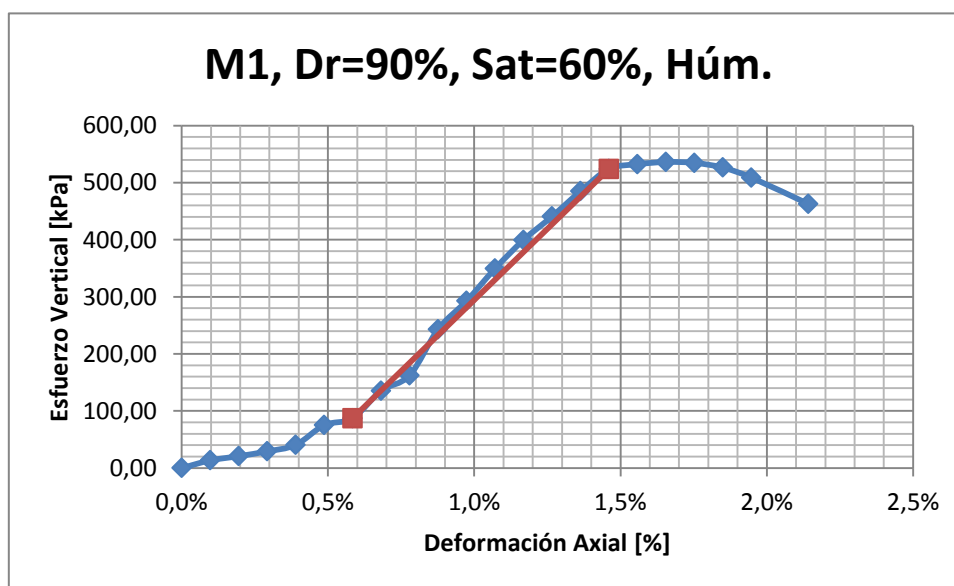
| ID probeta                                 | M1, Dr=90%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 435,93                    |
| w nominal [%]                              | 5%                        |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 521,89                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 501,82                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 91,24                     |
| Altura [cm]                                | 10,35                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 203,22                    |
| w real [%]                                 | 4,9%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,02                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,12                      |
| e real                                     | 0,39                      |
| Dr real [%]                                | 80,8%                     |
| Sat real [%]                               | 35,4%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 181551,96                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 1221,82                   |



**Gráfico 58: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 79: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

| ID probeta                                 | M1, Dr=90%, Sat=60%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 443,22                    |
| w nominal [%]                              | 7%                        |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 512,89                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 485,21                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,84                     |
| Altura [cm]                                | 10,3                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 201,65                    |
| w real [%]                                 | 7%                        |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,04                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,18                      |
| e real                                     | 0,37                      |
| Dr real [%]                                | 83%                       |
| Sat real [%]                               | 51%                       |
| Módulo de deformación [kPa]                | 49839,10                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 536,19                    |

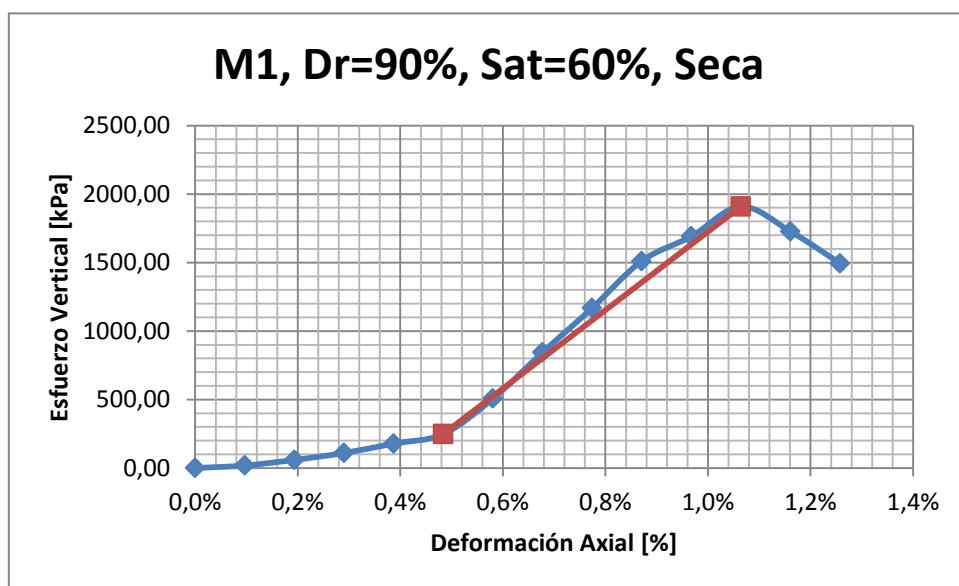


**Gráfico 59: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**



**Tabla 80: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

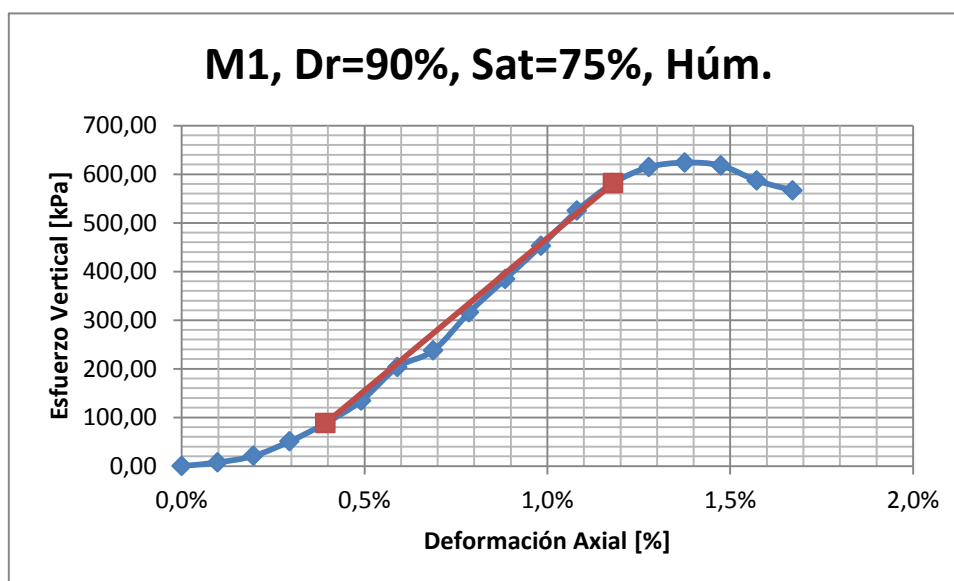
| ID probeta                                 | M1, Dr=90%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 443,22                    |
| w nominal [%]                              | 7%                        |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 513,7                     |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 484,54                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,7                      |
| Altura [cm]                                | 10,33                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 202,96                    |
| w real [%]                                 | 7,1%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,03                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,17                      |
| e real                                     | 0,38                      |
| Dr real [%]                                | 81,8%                     |
| Sat real [%]                               | 52,1%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 286150,09                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 1908,82                   |



**Gráfico 60: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 81: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

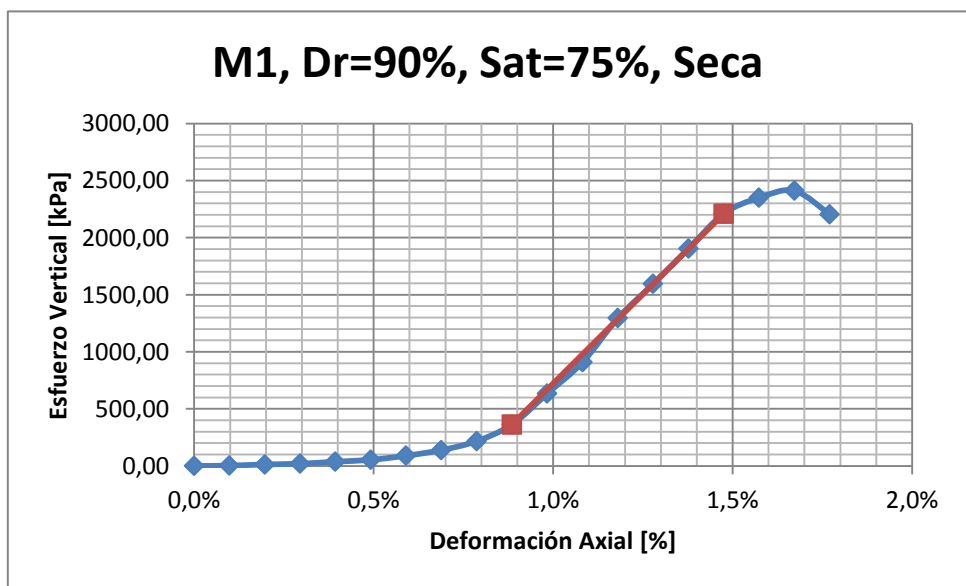
| ID probeta                                 | M1, Dr=90%, Sat=75%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 450,51                    |
| w nominal [%]                              | 9%                        |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 521,02                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 486                       |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,25                     |
| Altura [cm]                                | 10,2                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,0                       |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 199,75                    |
| w real [%]                                 | 8%                        |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,07                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,25                      |
| e real                                     | 0,35                      |
| Dr real [%]                                | 86%                       |
| Sat real [%]                               | 67%                       |
| Módulo de deformación [kPa]                | 62754,31                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 623,83                    |



**Gráfico 61: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 82: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

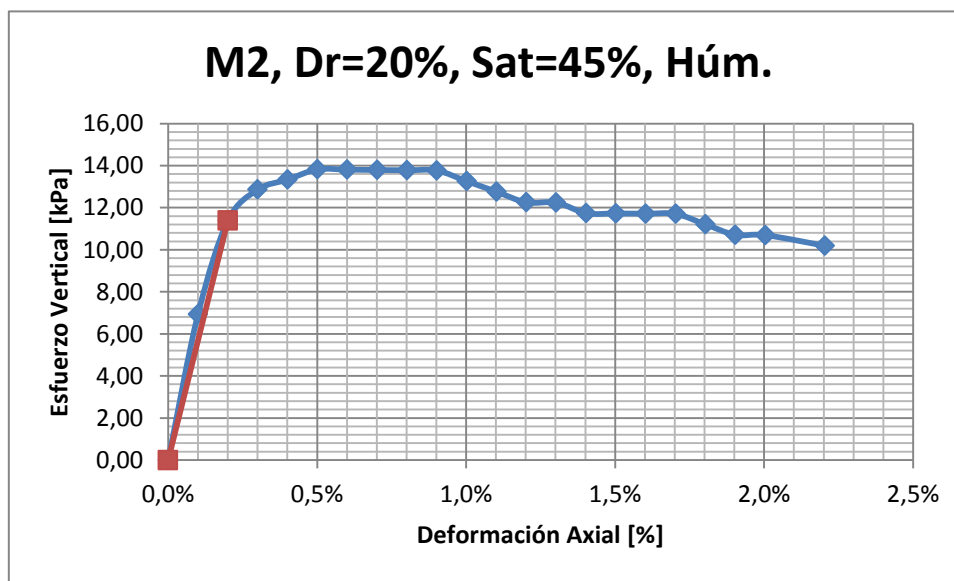
| ID probeta                                 | M1, Dr=90%, Sat=75%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 1                         |
| Gs                                         | 2,80                      |
| $e_{max}$                                  | 0,90                      |
| $e_{min}$                                  | 0,27                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 450,51                    |
| w nominal [%]                              | 9%                        |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 540,09                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 504,82                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 91,4                      |
| Altura [cm]                                | 10,16                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 199,62                    |
| w real [%]                                 | 8,5%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,07                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,25                      |
| e real                                     | 0,35                      |
| Dr real [%]                                | 86,2%                     |
| Sat real [%]                               | 67,7%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 312948,94                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 2410,75                   |



**Gráfico 62: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 83: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

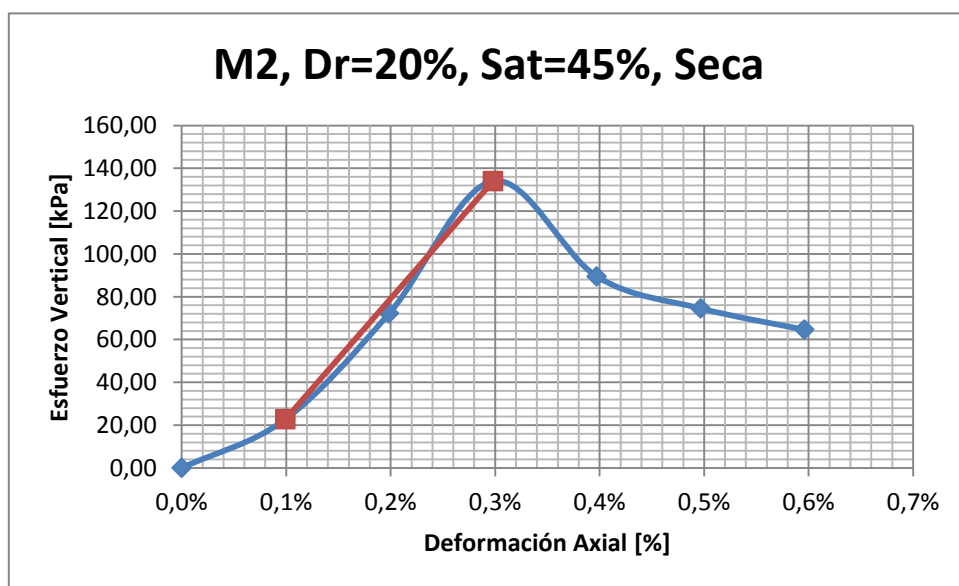
| ID probeta                                 | M2, Dr=20%, Sat=45%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 323,38                    |
| w nominal [%]                              | 14,5%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 394,96                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 354,76                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 71,57                     |
| Altura [cm]                                | 9,98                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 195,96                    |
| w real [%]                                 | 14,2%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,45                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,65                      |
| e real                                     | 0,85                      |
| Dr real [%]                                | 21,1%                     |
| Sat real [%]                               | 44,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 5682,39                   |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 13,82                     |



**Gráfico 63: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 84: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

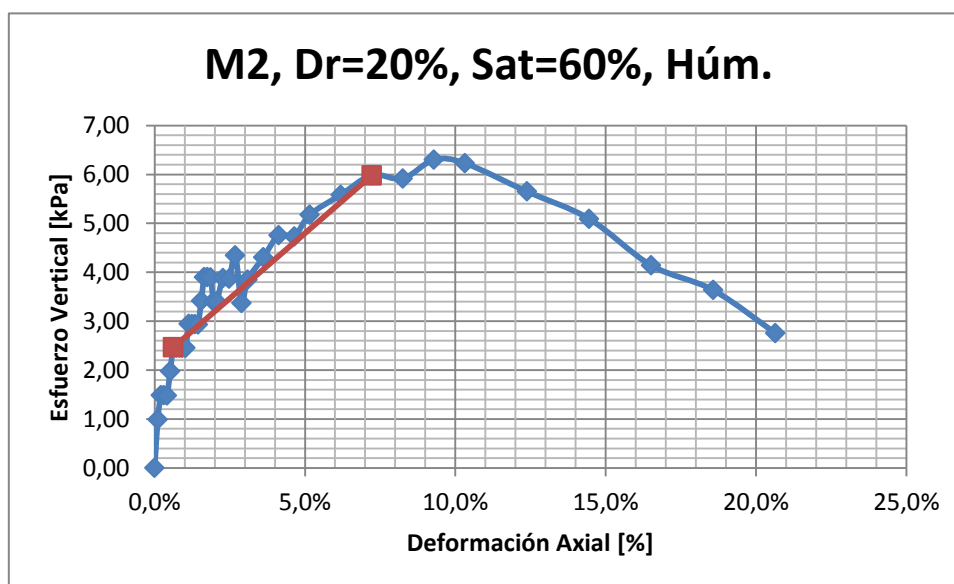
| ID probeta                                 | M2, Dr=20%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 323,38                    |
| w nominal [%]                              | 14,5%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 396,45                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 355,37                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,76                     |
| Altura [cm]                                | 10,06                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 197,66                    |
| w real [%]                                 | 14,5%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,43                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,64                      |
| e real                                     | 0,87                      |
| Dr real [%]                                | 18,3%                     |
| Sat real [%]                               | 44,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 55993,64                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 134,04                    |



**Gráfico 64: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 85: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

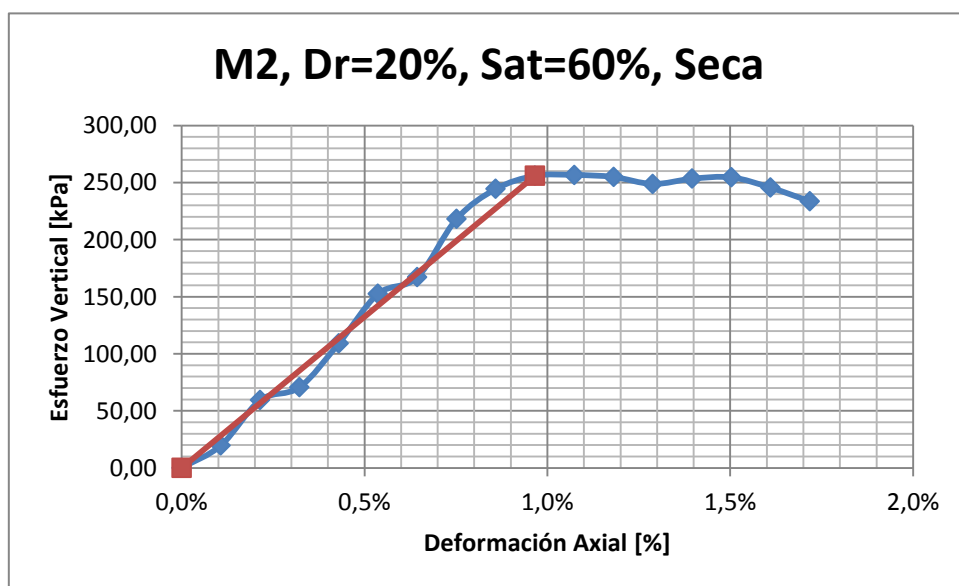
| ID probeta                                 | M2, Dr=20%, Sat=60%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 337,00                    |
| w nominal [%]                              | 19,3%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 417,04                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 363,86                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 78,55                     |
| Altura [cm]                                | 9,69                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 190,26                    |
| w real [%]                                 | 18,6%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,50                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,78                      |
| e real                                     | 0,78                      |
| Dr real [%]                                | 30,4%                     |
| Sat real [%]                               | 63,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 53,27                     |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 6,30                      |



**Gráfico 65: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 86: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

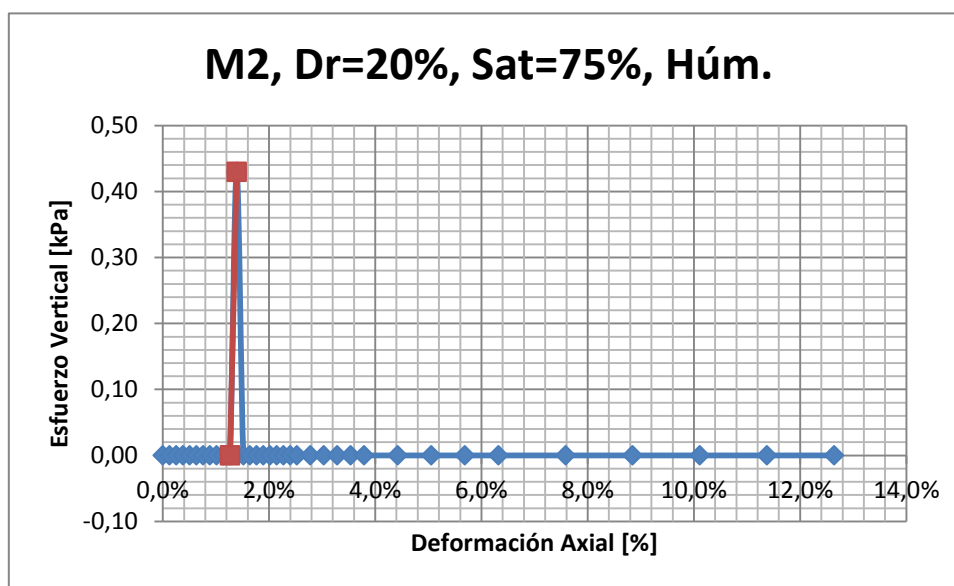
| ID probeta                                 | M2, Dr=20%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 337,00                    |
| w nominal [%]                              | 19,3%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 412,83                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 369,79                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 73,55                     |
| Altura [cm]                                | 9,31                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 182,87                    |
| w real [%]                                 | 14,5%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,62                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,86                      |
| e real                                     | 0,65                      |
| Dr real [%]                                | 48,7%                     |
| Sat real [%]                               | 59,7%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 26488,46                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 256,68                    |



**Gráfico 66: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 87: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

| ID probeta                                 | M2, Dr=20%, Sat=75%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 350,61                    |
| w nominal [%]                              | 24,1%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 418,07                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 352,81                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 73,11                     |
| Altura [cm]                                | 7,91                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,33                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 22,34                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 176,71                    |
| w real [%]                                 | 23,3%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,58                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,95                      |
| e real                                     | 0,69                      |
| Dr real [%]                                | 43,3%                     |
| Sat real [%]                               | 90,4%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 340,10                    |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 0,43                      |

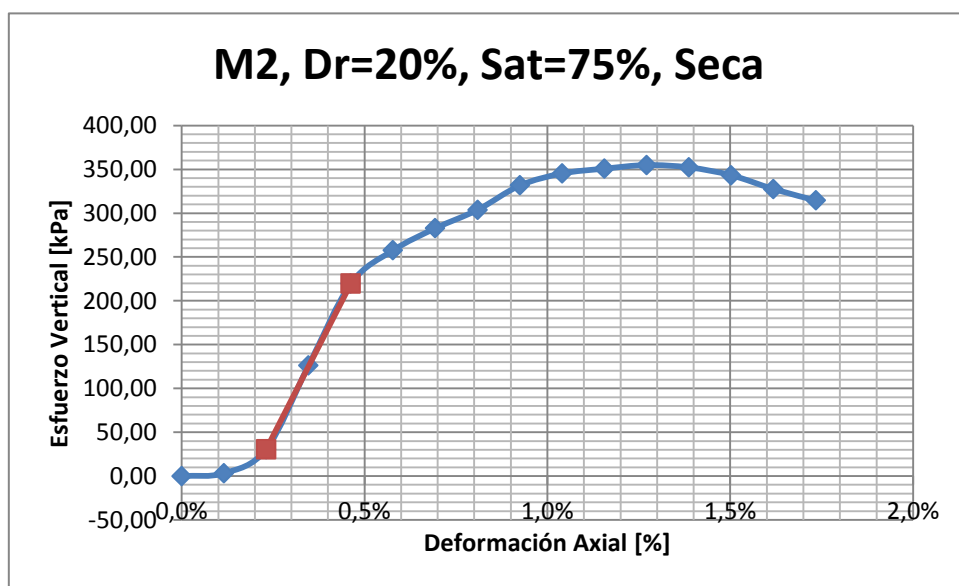


**Gráfico 67: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**



**Tabla 88: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

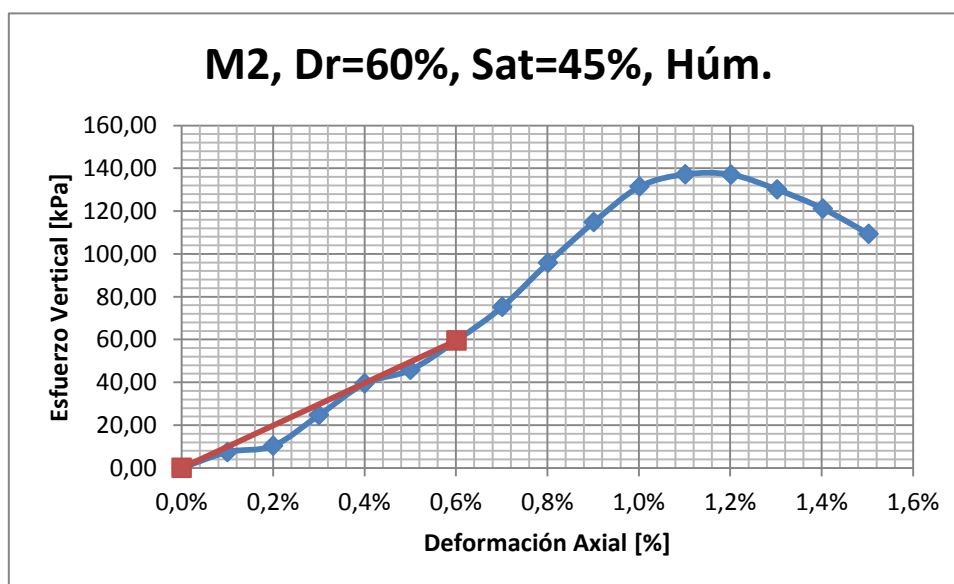
| ID probeta                                 | M2, Dr=20%, Sat=75%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 350,61                    |
| w nominal [%]                              | 24,1%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 418,98                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 355                       |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,79                     |
| Altura [cm]                                | 8,65                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,20                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 21,25                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 183,78                    |
| w real [%]                                 | 22,7%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,54                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,88                      |
| e real                                     | 0,74                      |
| Dr real [%]                                | 36,2%                     |
| Sat real [%]                               | 81,7%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 81682,99                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 354,88                    |



**Gráfico 68: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 89: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

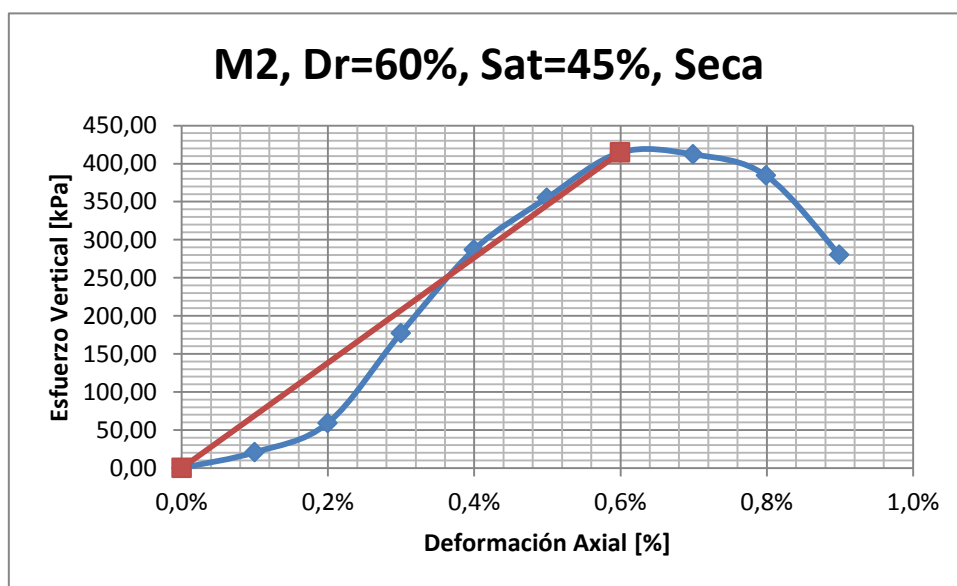
| ID probeta                                 | M2, Dr=60%, Sat=45%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 366,75                    |
| w nominal [%]                              | 9,6%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 463,06                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 430,21                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 96,18                     |
| Altura [cm]                                | 9,98                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,00                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,66                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 196,22                    |
| w real [%]                                 | 9,8%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,70                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,87                      |
| e real                                     | 0,57                      |
| Dr real [%]                                | 59,7%                     |
| Sat real [%]                               | 46,0%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 9911,53                   |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 137,20                    |



**Gráfico 69: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 90: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

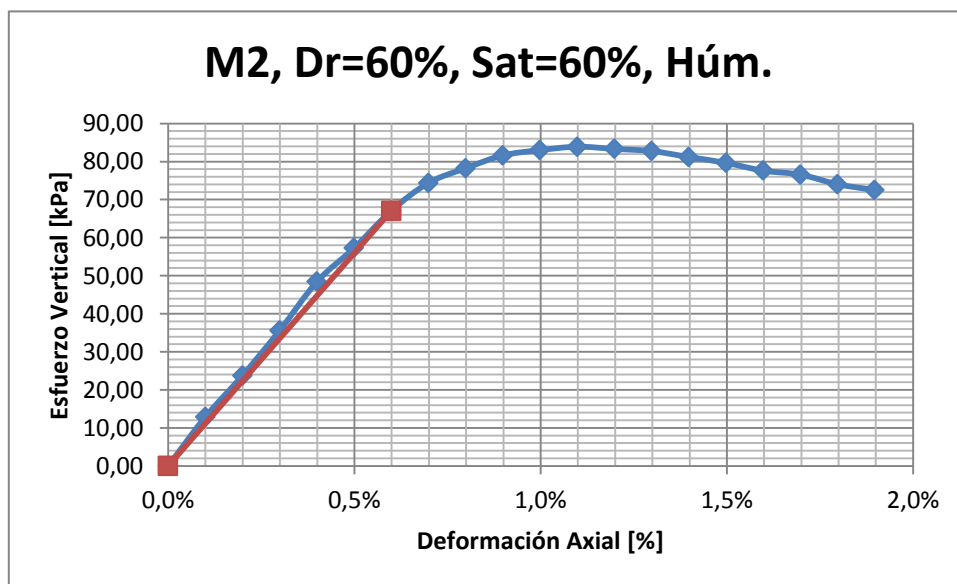
| ID probeta                                 | M2, Dr=60%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 366,75                    |
| w nominal [%]                              | 9,6%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 436,05                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 402,15                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 68,96                     |
| Altura [cm]                                | 10,01                     |
| Diámetro [cm]                              | 5,01                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,71                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 197,33                    |
| w real [%]                                 | 10,2%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,69                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,86                      |
| e real                                     | 0,58                      |
| Dr real [%]                                | 57,9%                     |
| Sat real [%]                               | 46,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 69159,60                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 414,54                    |



**Gráfico 70: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 91: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

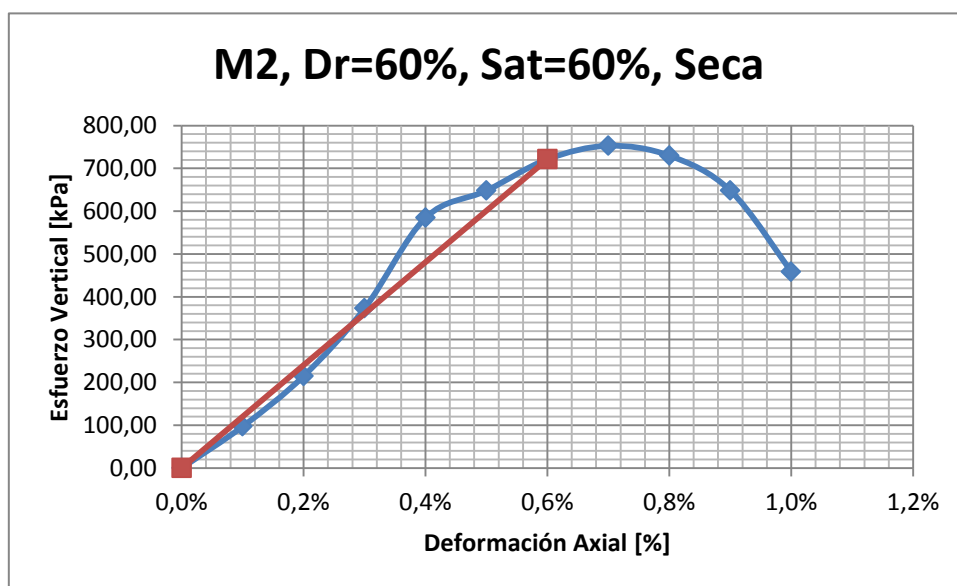
| ID probeta                                 | M2, Dr=60%, Sat=60%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 377,44                    |
| w nominal [%]                              | 12,8%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 486,66                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 443,05                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 109,19                    |
| Altura [cm]                                | 10,01                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 196,68                    |
| w real [%]                                 | 13,1%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,70                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,92                      |
| e real                                     | 0,58                      |
| Dr real [%]                                | 59,1%                     |
| Sat real [%]                               | 60,7%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 11196,32                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 83,90                     |



**Gráfico 71: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 92: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

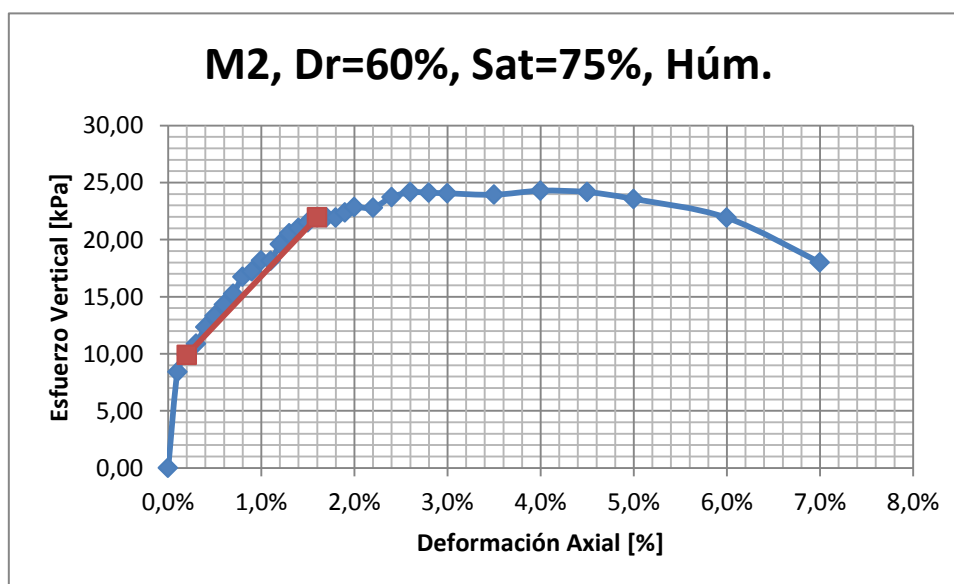
| ID probeta                                 | M2, Dr=60%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 377,44                    |
| w nominal [%]                              | 12,8%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 450,51                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 407,26                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,54                     |
| Altura [cm]                                | 10                        |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 196,35                    |
| w real [%]                                 | 12,9%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,70                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,92                      |
| e real                                     | 0,57                      |
| Dr real [%]                                | 60,0%                     |
| Sat real [%]                               | 60,7%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 120241,15                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 752,74                    |



**Gráfico 72: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 93: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

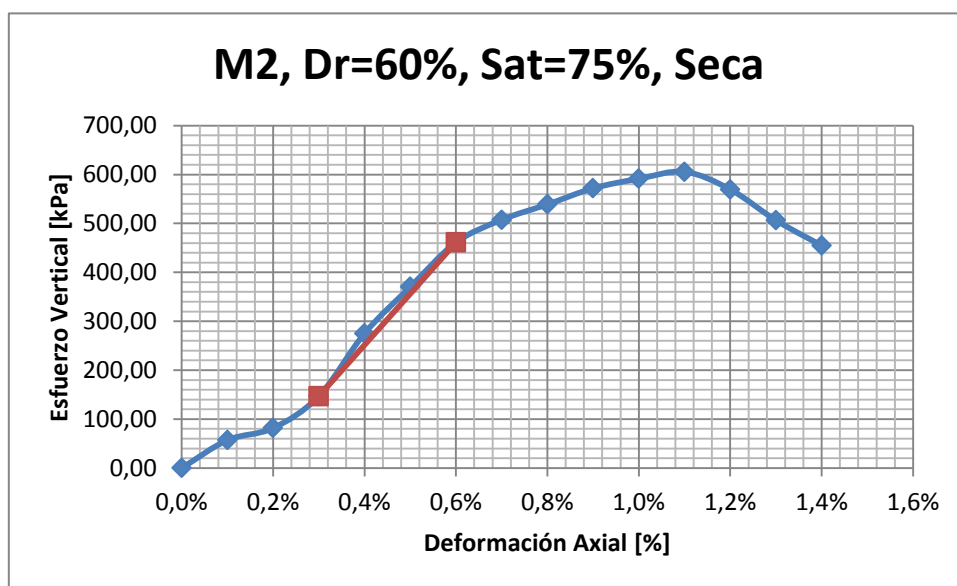
| ID probeta                                 | M2, Dr=60%, Sat=75%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 388,13                    |
| w nominal [%]                              | 16,0%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 460,86                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 406,91                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 73,06                     |
| Altura [cm]                                | 10                        |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 196,35                    |
| w real [%]                                 | 16,2%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,70                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,98                      |
| e real                                     | 0,57                      |
| Dr real [%]                                | 59,5%                     |
| Sat real [%]                               | 75,4%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 861,81                    |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 24,29                     |



**Gráfico 73: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 94: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

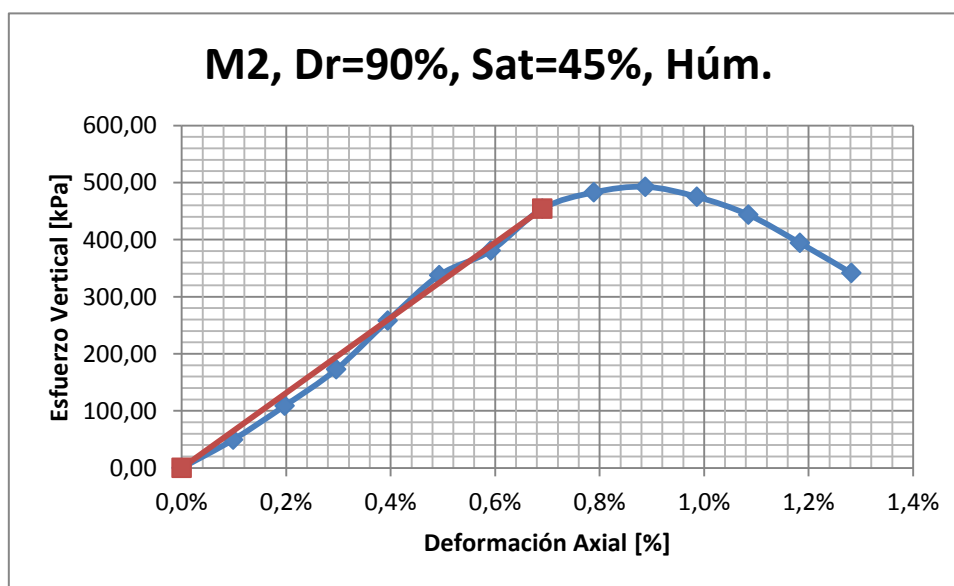
| ID probeta                                 | M2, Dr=60%, Sat=75%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 388,13                    |
| w nominal [%]                              | 16,0%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 481,58                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 429,11                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 93,95                     |
| Altura [cm]                                | 10                        |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 196,35                    |
| w real [%]                                 | 15,7%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,71                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,97                      |
| e real                                     | 0,57                      |
| Dr real [%]                                | 60,3%                     |
| Sat real [%]                               | 73,8%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 104724,64                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 605,46                    |



**Gráfico 74: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 95: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

| ID probeta                                 | M2, Dr=90%, Sat=45%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 411,46                    |
| w nominal [%]                              | 5,9%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 483,78                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 459,72                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,77                     |
| Altura [cm]                                | 10,14                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 199,10                    |
| w real [%]                                 | 6,2%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,94                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,06                      |
| e real                                     | 0,38                      |
| Dr real [%]                                | 86,7%                     |
| Sat real [%]                               | 44,2%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 65801,53                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 492,69                    |

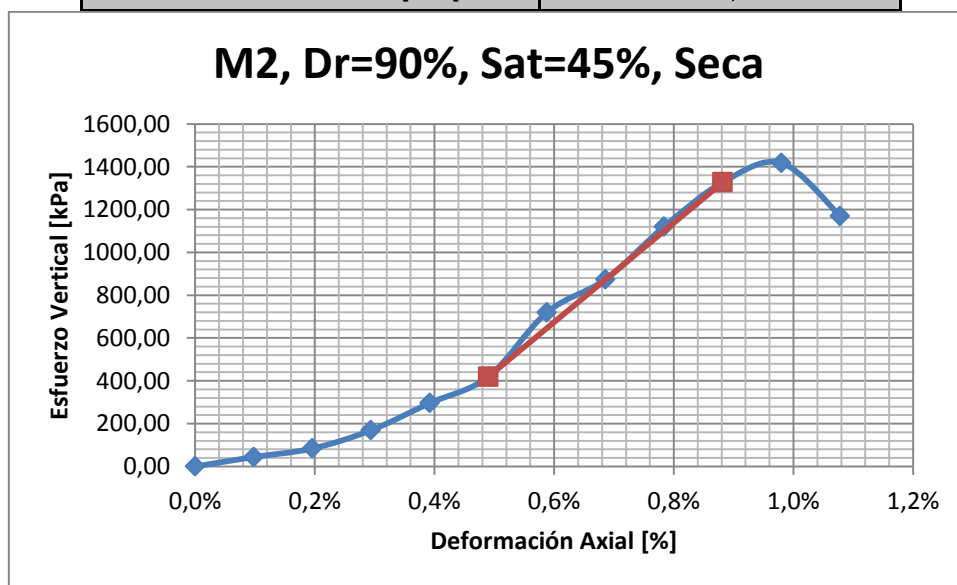


**Gráfico 75: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**



**Tabla 96: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

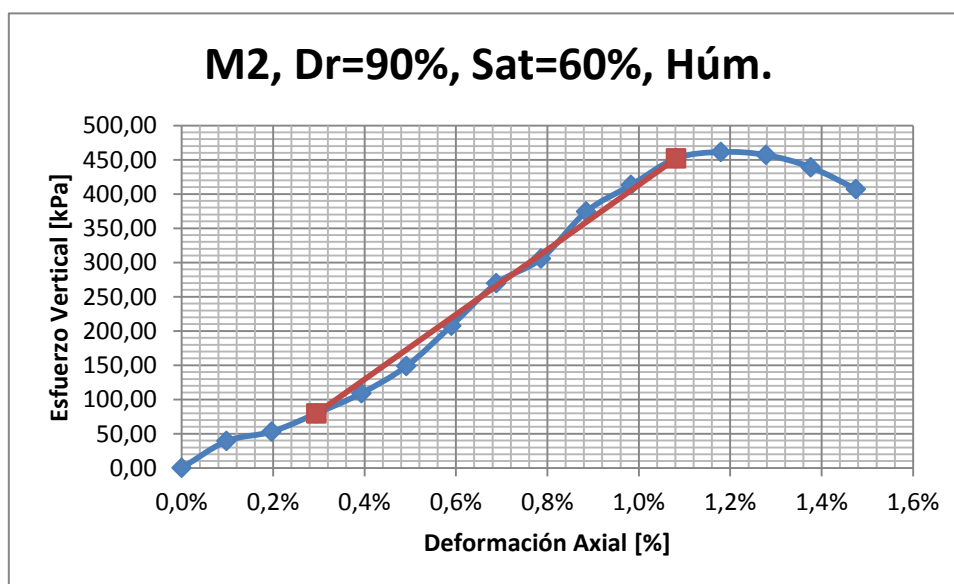
| ID probeta                                 | M2, Dr=90%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 411,46                    |
| w nominal [%]                              | 5,9%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 485,64                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 462,08                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 77,97                     |
| Altura [cm]                                | 10,20                     |
| Diámetro [cm]                              | 5,03                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,94                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 203,54                    |
| w real [%]                                 | 6,1%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,89                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,00                      |
| e real                                     | 0,42                      |
| Dr real [%]                                | 81,0%                     |
| Sat real [%]                               | 39,3%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 231841,59                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 1418,18                   |



**Gráfico 76: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 97: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

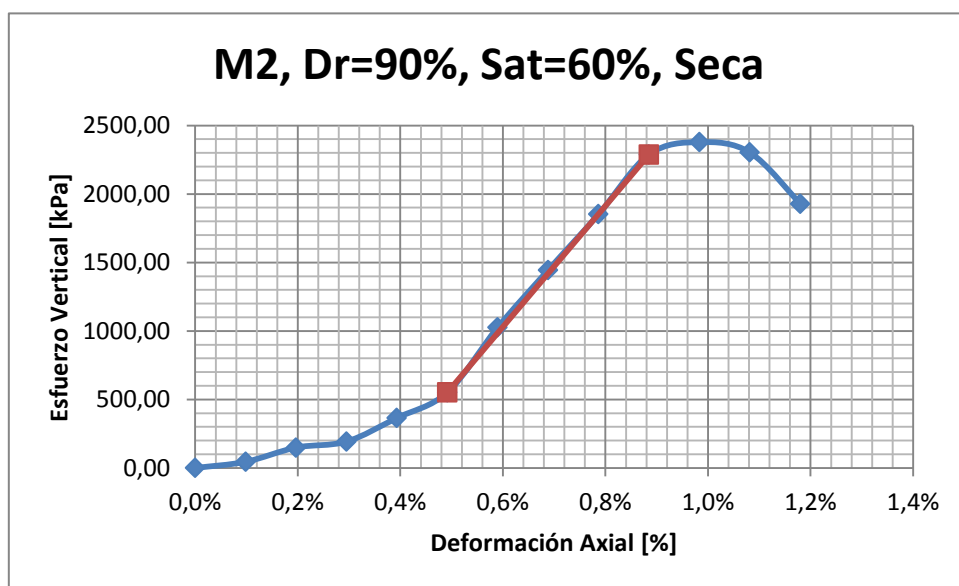
|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M2, Dr=90%, Sat=60%, Húm. |
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 419,13                    |
| w nominal [%]                              | 7,9%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 488,38                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 456,35                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,77                     |
| Altura [cm]                                | 10,17                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 199,69                    |
| w real [%]                                 | 8,4%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,92                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,08                      |
| e real                                     | 0,39                      |
| Dr real [%]                                | 84,4%                     |
| Sat real [%]                               | 56,9%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 47332,89                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 461,33                    |



**Gráfico 77: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 98: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

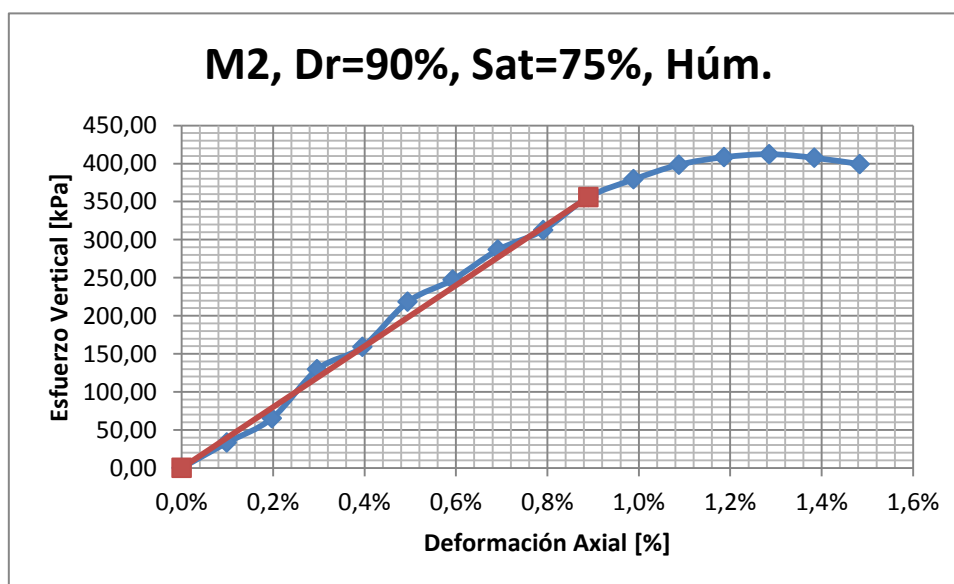
| ID probeta                                 | M2, Dr=90%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 419,13                    |
| w nominal [%]                              | 7,9%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 495,16                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 464,07                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 77,99                     |
| Altura [cm]                                | 10,17                     |
| Diámetro [cm]                              | 5,02                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,84                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 201,82                    |
| w real [%]                                 | 8,1%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,91                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,07                      |
| e real                                     | 0,40                      |
| Dr real [%]                                | 83,6%                     |
| Sat real [%]                               | 54,0%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 441657,37                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 2378,62                   |



**Gráfico 78: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 99: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

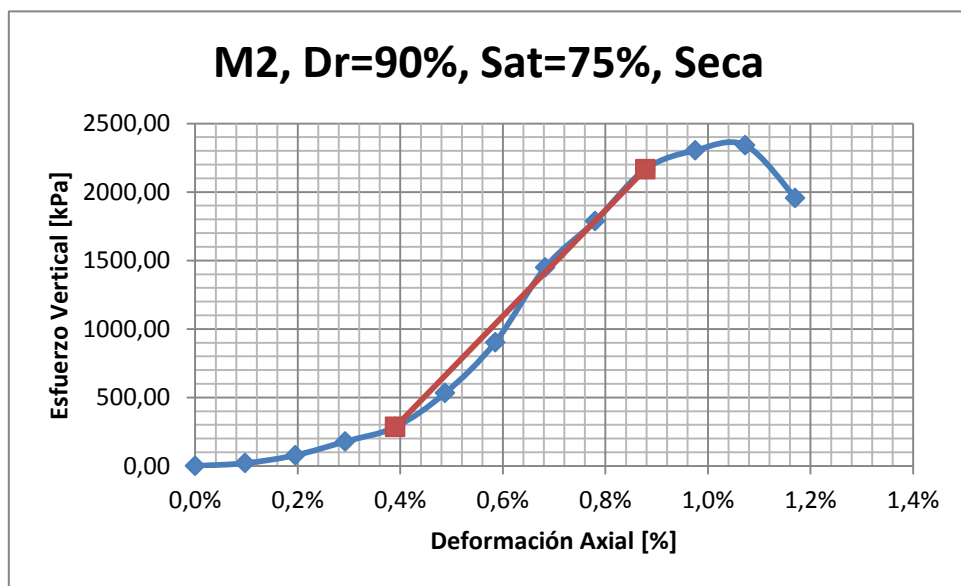
|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M2, Dr=90%, Sat=75%, Húm. |
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 426,81                    |
| w nominal [%]                              | 9,9%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 504,18                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 463,87                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 78,59                     |
| Altura [cm]                                | 10,11                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 198,57                    |
| w real [%]                                 | 10,5%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,94                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,14                      |
| e real                                     | 0,38                      |
| Dr real [%]                                | 86,3%                     |
| Sat real [%]                               | 73,9%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 40002,02                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 412,35                    |



**Gráfico 79: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 100: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

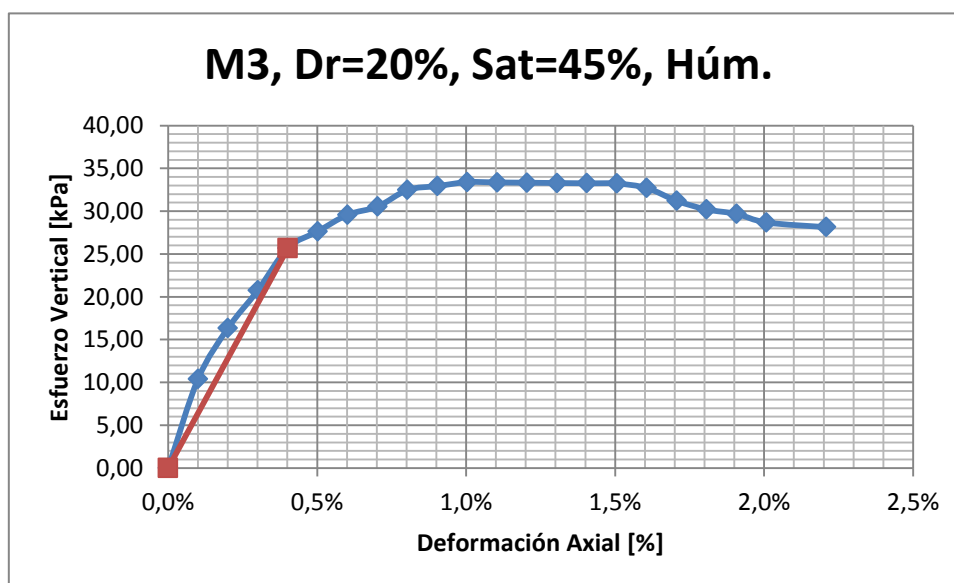
| ID probeta                                 | M2, Dr=90%, Sat=75%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 2                         |
| Gs                                         | 2,68                      |
| $e_{max}$                                  | 1,00                      |
| $e_{min}$                                  | 0,28                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 426,81                    |
| w nominal [%]                              | 9,9%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 497,61                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 460                       |
| Peso cápsula [gr]                          | 71,55                     |
| Altura [cm]                                | 10,25                     |
| Diámetro [cm]                              | 5,026666667               |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,84                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 203,48                    |
| w real [%]                                 | 9,7%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,91                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,09                      |
| e real                                     | 0,40                      |
| Dr real [%]                                | 83,2%                     |
| Sat real [%]                               | 64,5%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 385841,72                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 2341,51                   |



**Gráfico 80: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 101: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

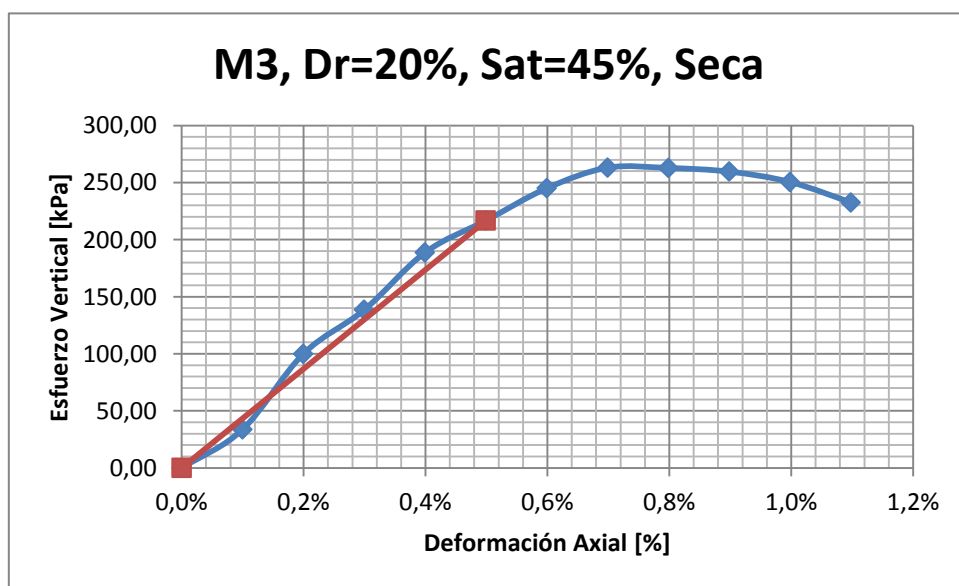
|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M3, Dr=20%, Sat=45%, Húm. |
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 350,61                    |
| w nominal [%]                              | 13,0%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 450,94                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 409,24                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 88,96                     |
| Altura [cm]                                | 9,96                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 195,56                    |
| w real [%]                                 | 13,0%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,64                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,85                      |
| e real                                     | 0,66                      |
| Dr real [%]                                | 37,8%                     |
| Sat real [%]                               | 53,5%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 6397,77                   |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 33,40                     |



**Gráfico 81: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 102: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

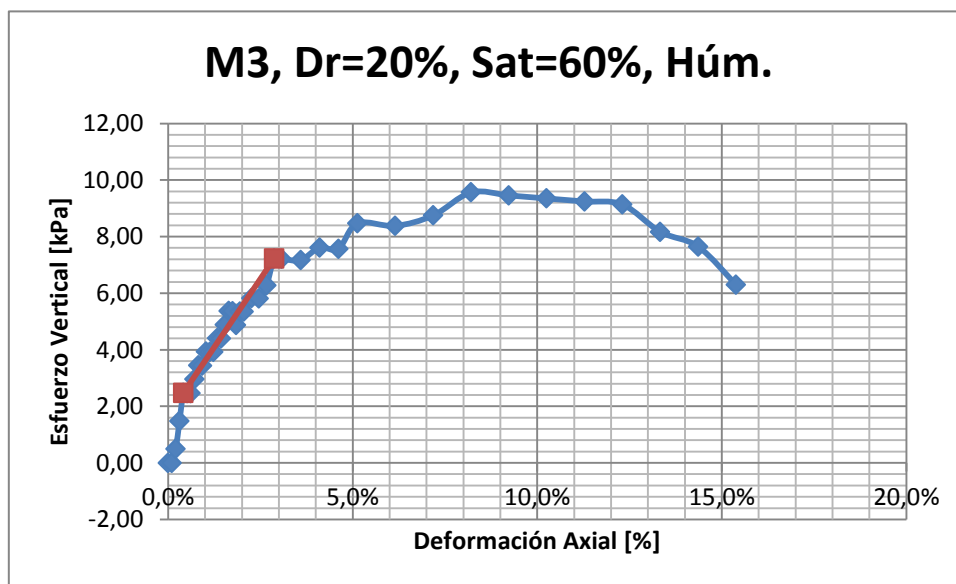
| ID probeta                                 | M3, Dr=20%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| E <sub>max</sub>                           | 0,93                      |
| E <sub>min</sub>                           | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 350,61                    |
| w nominal [%]                              | 13,0%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 455,41                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 414,48                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 93,09                     |
| Altura [cm]                                | 10,01                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 196,68                    |
| w real [%]                                 | 12,7%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,63                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,84                      |
| e real                                     | 0,67                      |
| Dr real [%]                                | 37,3%                     |
| Sat real [%]                               | 52,1%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 43412,83                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 263,07                    |



**Gráfico 82: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 103: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M3, Dr=20%, Sat=60%, Húm. |
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 337,00                    |
| w nominal [%]                              | 17,4%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 423,78                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 373,46                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,53                     |
| Altura [cm]                                | 9,75                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 191,44                    |
| w real [%]                                 | 16,7%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,57                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,83                      |
| e real                                     | 0,73                      |
| Dr real [%]                                | 28,0%                     |
| Sat real [%]                               | 62,2%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 193,27                    |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 9,56                      |

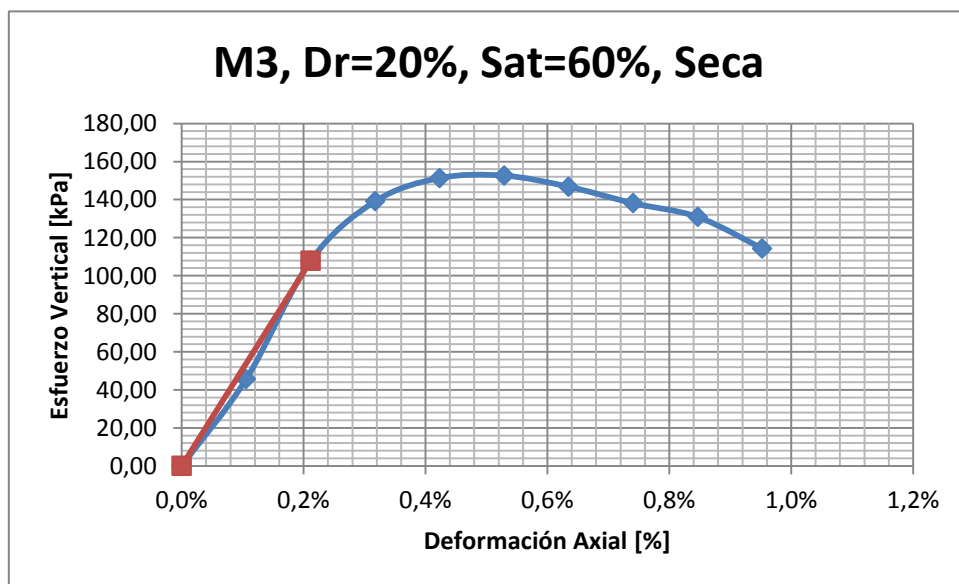


**Gráfico 83: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**



**Tabla 104: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

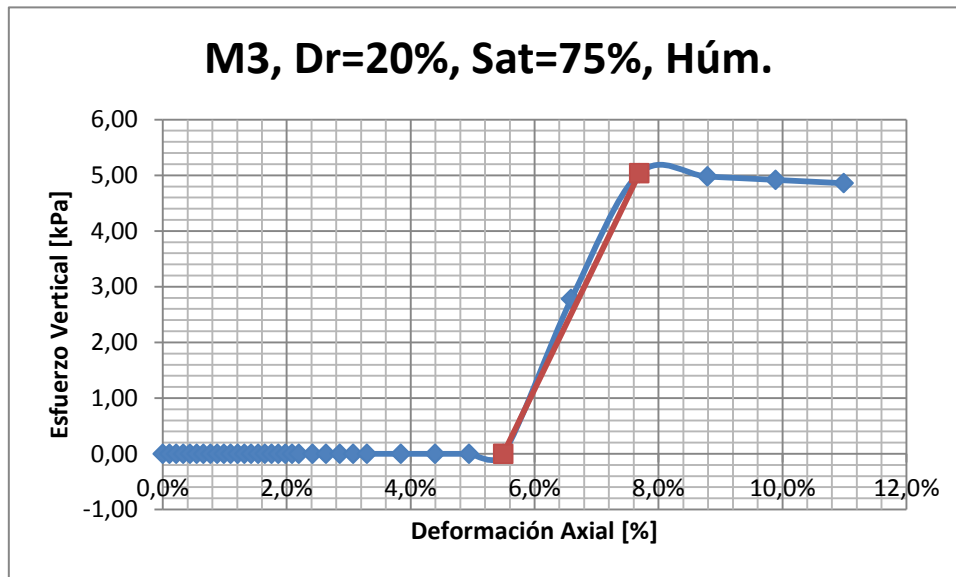
| ID probeta                                 | M3, Dr=20%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| E <sub>max</sub>                           | 0,93                      |
| E <sub>min</sub>                           | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 337,00                    |
| w nominal [%]                              | 17,4%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 426,66                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 376,97                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 77,34                     |
| Altura [cm]                                | 9,44                      |
| Diámetro [cm]                              | 5,10                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 20,45                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 193,15                    |
| w real [%]                                 | 16,6%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,55                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,81                      |
| e real                                     | 0,75                      |
| Dr real [%]                                | 24,7%                     |
| Sat real [%]                               | 59,8%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 50974,03                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 152,60                    |



**Gráfico 84: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 105: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

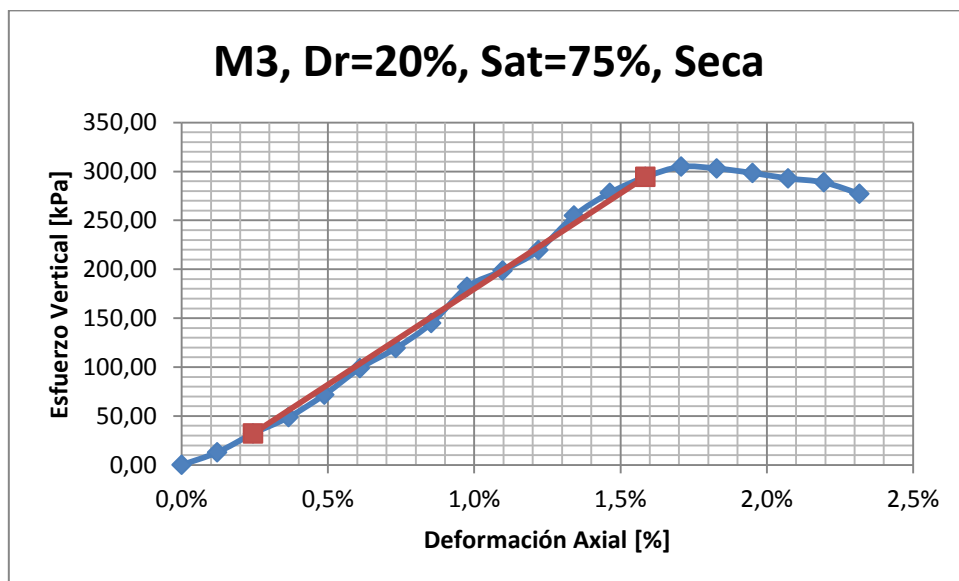
|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M3, Dr=20%, Sat=75%, Húm. |
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 323,38                    |
| w nominal [%]                              | 21,7%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 413,04                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 356,29                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 77,22                     |
| Altura [cm]                                | 9,1                       |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 178,68                    |
| w real [%]                                 | 20,3%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,56                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,88                      |
| e real                                     | 0,74                      |
| Dr real [%]                                | 26,4%                     |
| Sat real [%]                               | 74,5%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 229,20                    |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 5,32                      |



**Gráfico 85: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 106: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

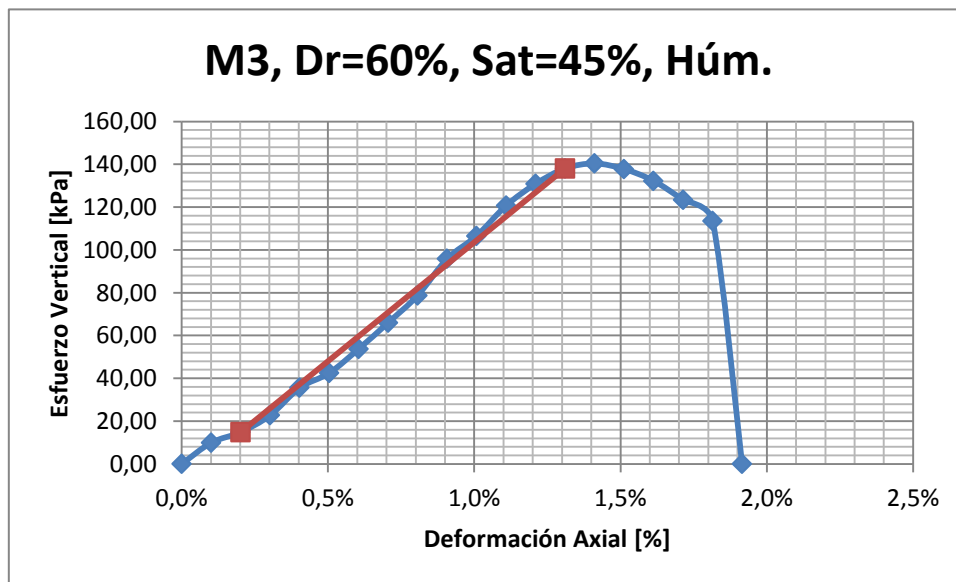
| ID probeta                                 | M3, Dr=20%, Sat=75%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| E <sub>max</sub>                           | 0,93                      |
| E <sub>min</sub>                           | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 20%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 323,38                    |
| w nominal [%]                              | 21,7%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 414,28                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 356,81                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 77,35                     |
| Altura [cm]                                | 8,2                       |
| Diámetro [cm]                              | 5,07                      |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 20,26                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 166,13                    |
| w real [%]                                 | 20,6%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,68                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,03                      |
| e real                                     | 0,62                      |
| Dr real [%]                                | 44,1%                     |
| Sat real [%]                               | 90,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 19544,96                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 304,83                    |



**Gráfico 86: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 107: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

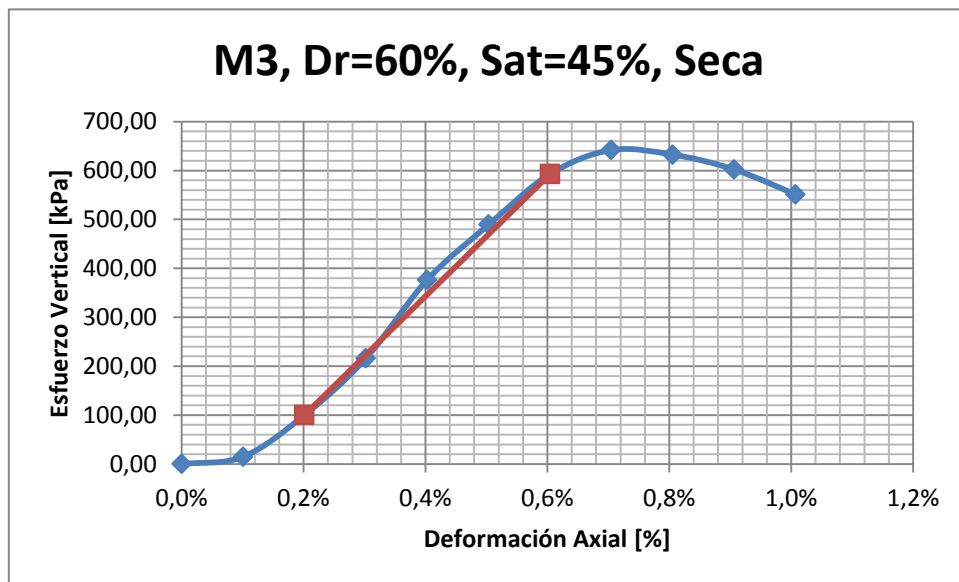
|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M3, Dr=60%, Sat=45%, Húm. |
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 366,75                    |
| w nominal [%]                              | 8,4%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 460,56                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 430,75                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 78,6                      |
| Altura [cm]                                | 9,92                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 194,78                    |
| w real [%]                                 | 8,5%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,81                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,96                      |
| e real                                     | 0,51                      |
| Dr real [%]                                | 60,0%                     |
| Sat real [%]                               | 45,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 11111,76                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 140,37                    |



**Gráfico 87: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 108: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

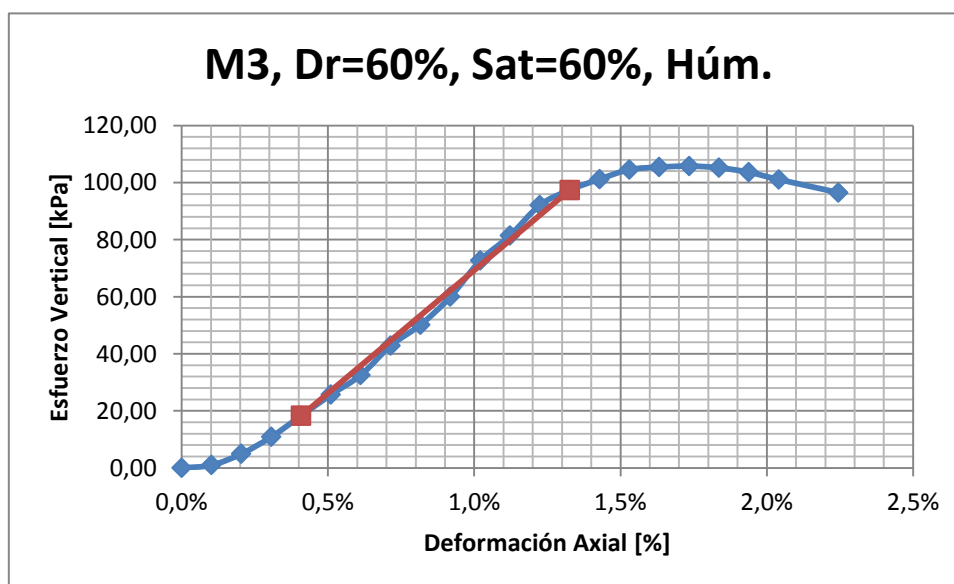
| ID probeta                                 | M3, Dr=60%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 366,75                    |
| w nominal [%]                              | 8,4%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 475,99                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 446,83                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 92,8                      |
| Altura [cm]                                | 9,93                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 194,98                    |
| w real [%]                                 | 8,2%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,82                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 1,97                      |
| e real                                     | 0,50                      |
| Dr real [%]                                | 61,0%                     |
| Sat real [%]                               | 44,9%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 122313,71                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 641,87                    |



**Gráfico 88: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 109: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

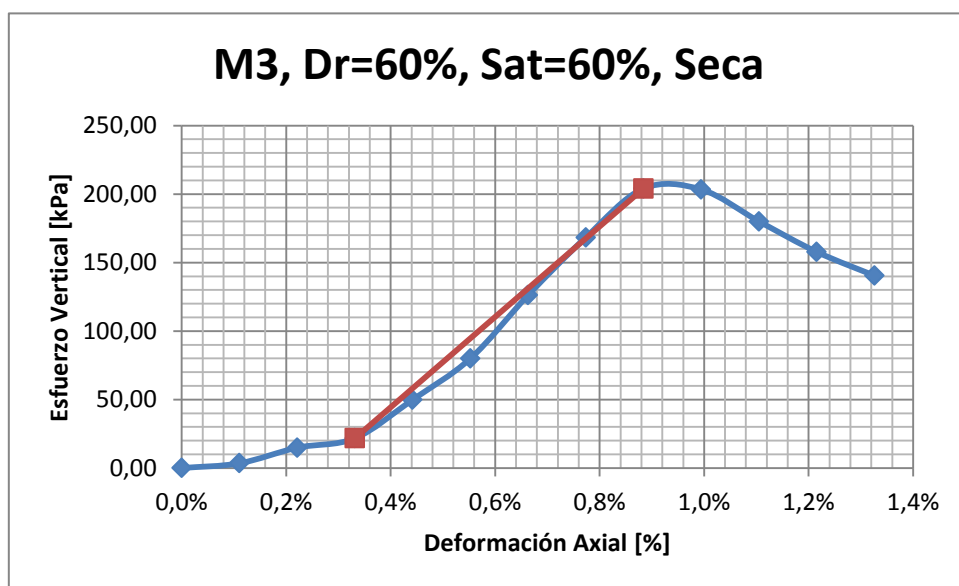
| ID probeta                                 | M3, Dr=60%, Sat=60%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 377,44                    |
| w nominal [%]                              | 11,1%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 466,29                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 424,99                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 73,58                     |
| Altura [cm]                                | 9,8                       |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 192,42                    |
| w real [%]                                 | 11,8%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,83                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,04                      |
| e real                                     | 0,49                      |
| Dr real [%]                                | 62,2%                     |
| Sat real [%]                               | 65,2%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 8616,85                   |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 105,79                    |



**Gráfico 89: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 110: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

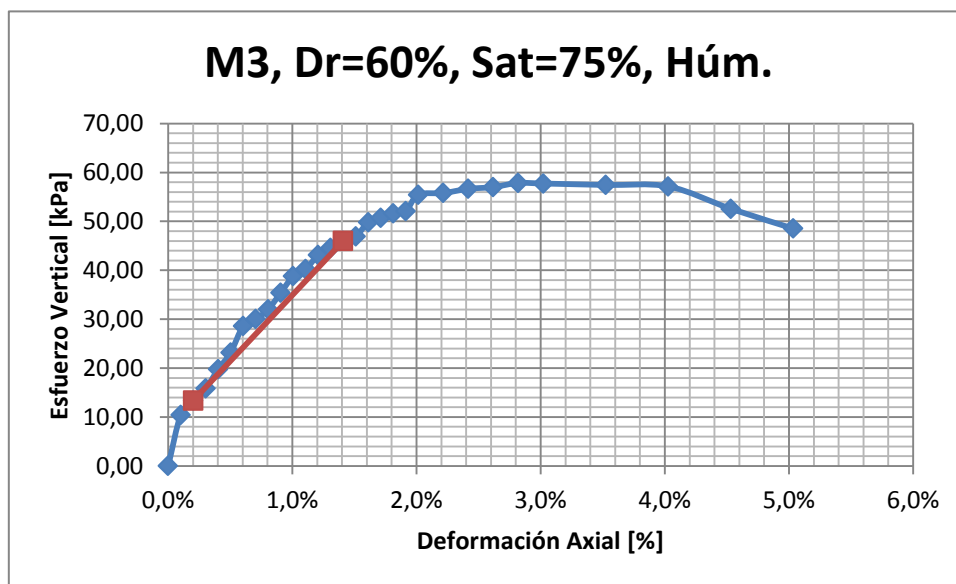
| ID probeta                                 | M3, Dr=60%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 377,44                    |
| w nominal [%]                              | 11,1%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 447,47                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 413,38                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 92,48                     |
| Altura [cm]                                | 9,05                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 177,70                    |
| w real [%]                                 | 10,6%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,81                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,00                      |
| e real                                     | 0,51                      |
| Dr real [%]                                | 59,8%                     |
| Sat real [%]                               | 57,0%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 32997,63                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 204,06                    |



**Gráfico 90: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 111: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

| ID probeta                                 | M3, Dr=60%, Sat=75%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 388,13                    |
| w nominal [%]                              | 13,9%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 474,29                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 425,94                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,38                     |
| Altura [cm]                                | 9,93                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 194,98                    |
| w real [%]                                 | 13,7%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,81                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,06                      |
| e real                                     | 0,50                      |
| Dr real [%]                                | 60,7%                     |
| Sat real [%]                               | 74,3%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 2698,36                   |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 57,85                     |

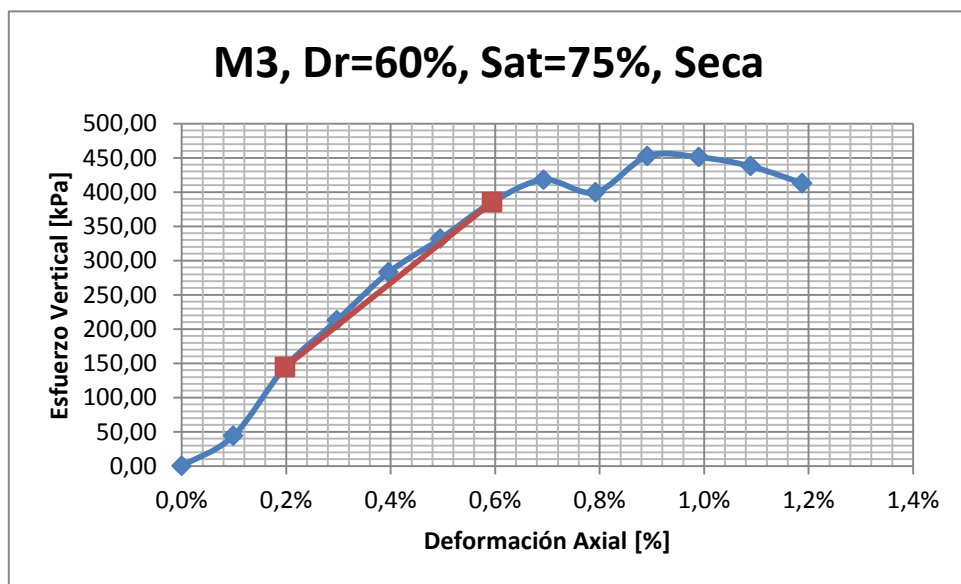


**Gráfico 91: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**



**Tabla 112: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

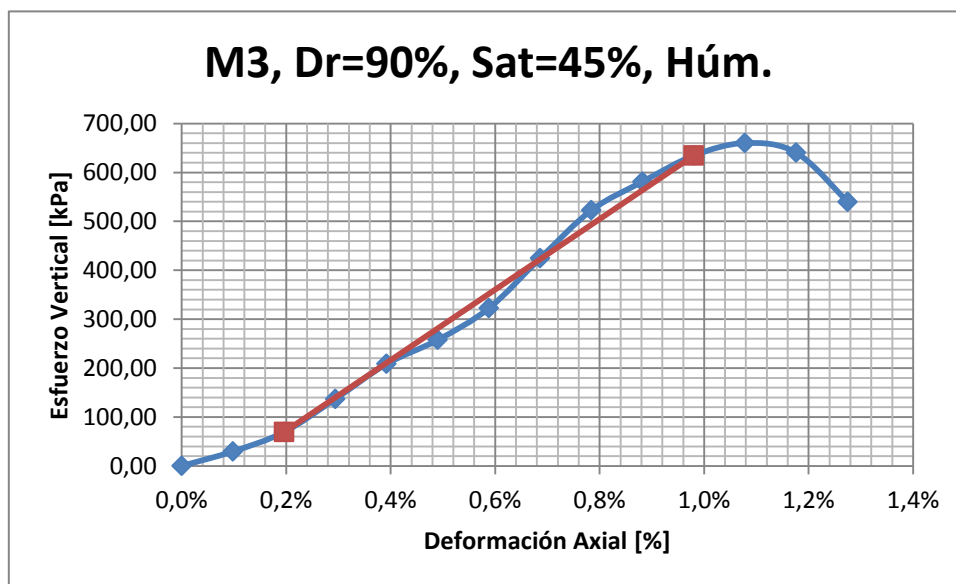
| ID probeta                                 | M3, Dr=60%, Sat=75%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 60%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 388,13                    |
| w nominal [%]                              | 13,9%                     |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 475,29                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 425,84                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,13                     |
| Altura [cm]                                | 10,1                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 198,31                    |
| w real [%]                                 | 14,0%                     |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 1,78                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,03                      |
| e real                                     | 0,53                      |
| Dr real [%]                                | 57,1%                     |
| Sat real [%]                               | 72,3%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 60746,58                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 452,35                    |



**Gráfico 92: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 113: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

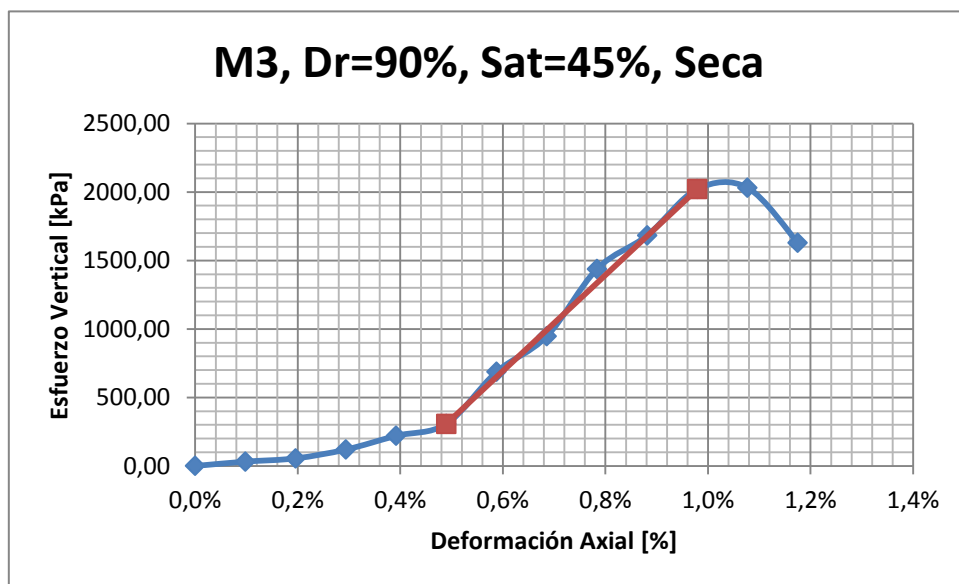
|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M3, Dr=90%, Sat=45%, Húm. |
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 411,46                    |
| w nominal [%]                              | 4,9%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 504,65                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 483,85                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 72,74                     |
| Altura [cm]                                | 10,2                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 200,28                    |
| w real [%]                                 | 5,1%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,05                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,16                      |
| e real                                     | 0,33                      |
| Dr real [%]                                | 85,5%                     |
| Sat real [%]                               | 42,2%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 72084,06                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 660,07                    |



**Gráfico 93: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 114: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

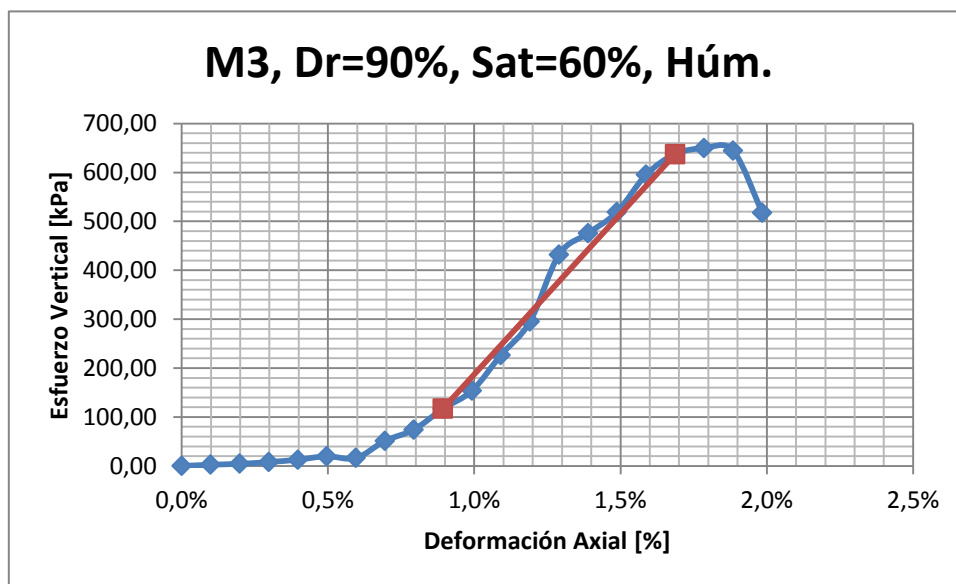
| ID probeta                                 | M3, Dr=90%, Sat=45%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| E <sub>max</sub>                           | 0,93                      |
| E <sub>min</sub>                           | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 45%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 411,46                    |
| w nominal [%]                              | 4,9%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 504,27                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 489,7                     |
| Peso cápsula [gr]                          | 73,01                     |
| Altura [cm]                                | 10,21                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 200,47                    |
| w real [%]                                 | 3,5%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,08                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,15                      |
| e real                                     | 0,31                      |
| Dr real [%]                                | 87,8%                     |
| Sat real [%]                               | 30,7%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 350183,10                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 2030,27                   |



**Gráfico 94: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 115: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

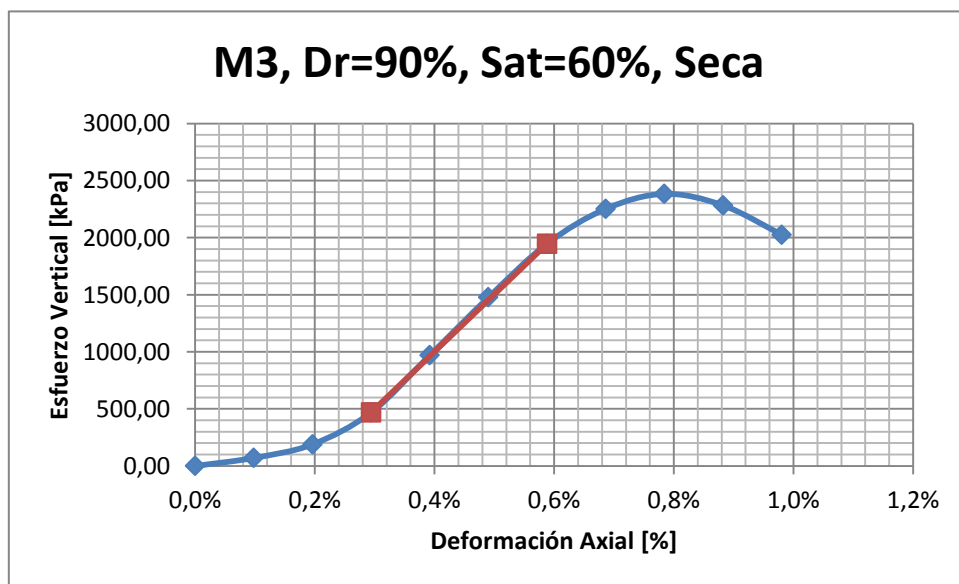
| ID probeta                                 | M3, Dr=90%, Sat=60%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 419,13                    |
| w nominal [%]                              | 6,5%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 515,03                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 487,18                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 78,57                     |
| Altura [cm]                                | 10,08                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 197,92                    |
| w real [%]                                 | 6,8%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,06                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,21                      |
| e real                                     | 0,32                      |
| Dr real [%]                                | 86,6%                     |
| Sat real [%]                               | 58,2%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 65577,34                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 649,50                    |



**Gráfico 95: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 116: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

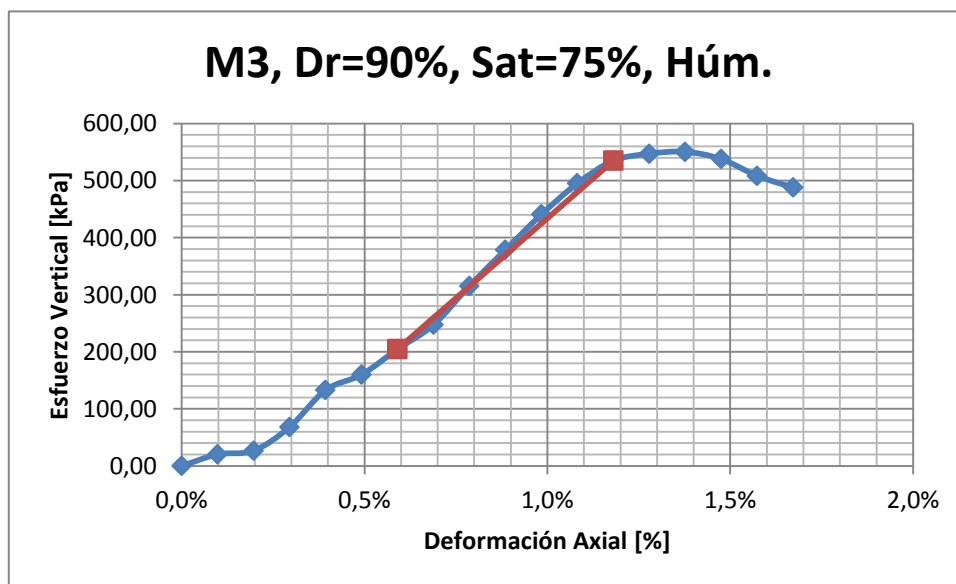
| ID probeta                                 | M3, Dr=90%, Sat=60%, Seca |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 60%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 419,13                    |
| w nominal [%]                              | 6,5%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 515,48                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 483,68                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 78,15                     |
| Altura [cm]                                | 10,2                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 200,28                    |
| w real [%]                                 | 7,8%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,02                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,18                      |
| e real                                     | 0,34                      |
| Dr real [%]                                | 82,9%                     |
| Sat real [%]                               | 62,0%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 502412,04                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 2383,30                   |



**Gráfico 96: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 117: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

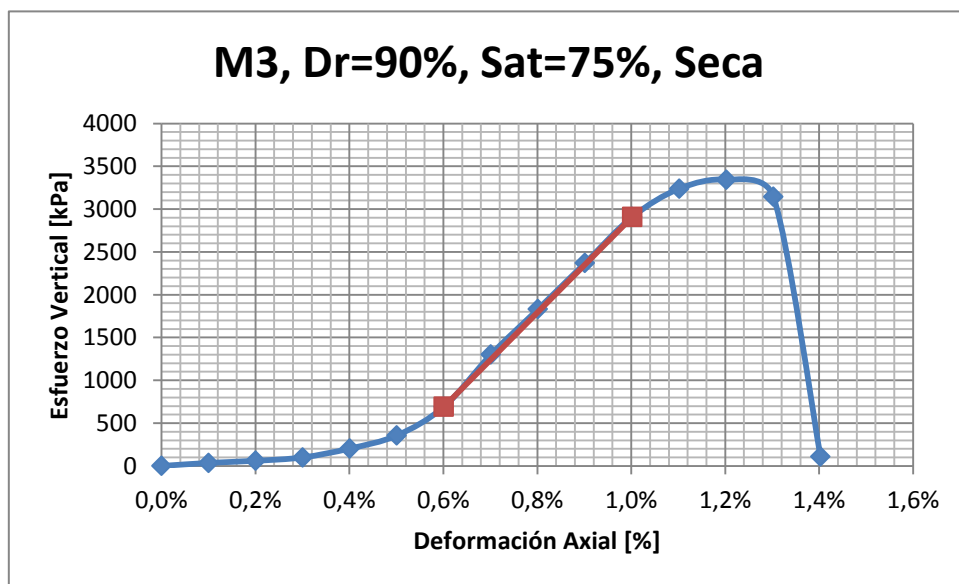
| ID probeta                                 | M3, Dr=90%, Sat=75%, Húm. |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 426,81                    |
| w nominal [%]                              | 8,1%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 522,55                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 485,78                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 78,43                     |
| Altura [cm]                                | 10,16                     |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 199,62                    |
| w real [%]                                 | 9,0%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,04                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,22                      |
| e real                                     | 0,33                      |
| Dr real [%]                                | 84,4%                     |
| Sat real [%]                               | 73,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 55949,46                  |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 550,43                    |



**Gráfico 97: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

**Tabla 118: Propiedades de probeta sometida a compresión no confinada.**

|                                            |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|
| ID probeta                                 | M3, Dr=90%, Sat=75%, Seca |
| Muestra                                    | 3                         |
| Gs                                         | 2,72                      |
| $e_{max}$                                  | 0,93                      |
| $e_{min}$                                  | 0,22                      |
| Dr nominal [%]                             | 90%                       |
| Sat nominal [%]                            | 75%                       |
| Peso nominal [gr]                          | 426,81                    |
| w nominal [%]                              | 8,1%                      |
| Peso probeta húmeda + cápsula [gr]         | 514,42                    |
| Peso probeta seca + cápsula [gr]           | 478,44                    |
| Peso cápsula [gr]                          | 71,19                     |
| Altura [cm]                                | 9,98                      |
| Diámetro [cm]                              | 5                         |
| Área [cm <sup>2</sup> ]                    | 19,63                     |
| Volumen [cm <sup>3</sup> ]                 | 195,96                    |
| w real [%]                                 | 8,8%                      |
| Densidad seca real [gr/cm <sup>3</sup> ]   | 2,08                      |
| Densidad húmeda real [gr/cm <sup>3</sup> ] | 2,26                      |
| e real                                     | 0,31                      |
| Dr real [%]                                | 87,8%                     |
| Sat real [%]                               | 77,6%                     |
| Módulo de deformación [kPa]                | 553175,99                 |
| Resistencia máxima [kPa]                   | 3343,73                   |



**Gráfico 98: Curva esfuerzo vertical versus deformación ensayo de compresión no confinada.**

## 8.8 CONSOLIDACIÓN EDMÉTRICA

Tabla 119: Condiciones iniciales para consolidación edométrica, Muestra 1

| Condiciones iniciales M1 |       |
|--------------------------|-------|
| Gs                       | 2.65  |
| emax                     | 0.90  |
| dmin                     | 1.39  |
| Diámetro                 | 7.12  |
| Altura inicial [cm]      | 3     |
| Vol inicial [cm3]        | 119   |
| Masa [gr]                | 166   |
| Humedad inicial [%]      | 0%    |
| Volumen sólidos [cm3]    | 62.85 |
| Volumen vacíos [cm3]     | 56.60 |

Tabla 120: Condiciones iniciales para consolidación edométrica, Muestra 2

| Condiciones iniciales M2 |       |
|--------------------------|-------|
| Gs                       | 2.62  |
| emax                     | 1.00  |
| dmin                     | 1.31  |
| Diámetro                 | 7.12  |
| Altura inicial [cm]      | 3     |
| Vol inicial [cm3]        | 119   |
| Masa [gr]                | 156   |
| Humedad inicial [%]      | 0%    |
| Volumen sólidos [cm3]    | 59.60 |
| Volumen vacíos [cm3]     | 59.85 |

Tabla 121: Condiciones iniciales para consolidación edométrica, Muestra 3

| Condiciones iniciales |       |
|-----------------------|-------|
| Gs                    | 2.69  |
| emax                  | 0.93  |
| d inicial             | 1.41  |
| Diámetro              | 7.1   |
| Altura inicial [cm]   | 3     |
| Vol inicial [cm3]     | 119   |
| Masa [gr]             | 168   |
| Humedad inicial [%]   | 0%    |
| Volumen sólidos [cm3] | 61.57 |
| Volumen vacíos [cm3]  | 57.21 |

Tabla 122: Datos de consolidación edométrica, Muestra 1

| Tiempo [Min] |  | Carga [Kg/cm2] | Descarga [Kg/cm2] |
|--------------|--|----------------|-------------------|
|              |  |                |                   |



|       | Saturació n | 0.1         | 0.2 | 0.5 | 1   | 2   | 4   | 8   | 4              | 2   | 1   | 0.5 | 0.2 | 0.1 | 0   |
|-------|-------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|       |             | Carga [kPa] |     |     |     |     |     |     | Descarga [kPa] |     |     |     |     |     |     |
|       | 0           | 9.8         | 24. | 49  | 98. | 196 | 392 | 784 | 392            | 196 | 98. | 49  | 24. | 9.8 | 0   |
|       |             | 1           | 5   |     | 1   |     |     |     |                |     | 1   | 5   | 1   |     |     |
| 0     | 0           | -41         | -6  | 66  | 150 | 281 | 391 | 521 | 624            | 620 | 613 | 605 | 592 | 589 | 582 |
| 0.1   | 0           | -40         | -5  | 72  | 156 | 28  | 403 | 532 | 620            | 615 | 609 | 597 | 590 | 587 | 581 |
| 0.25  | -2          | -39         | -3  | 75  | 157 | 289 | 404 | 533 | 620            | 615 | 609 | 597 | 590 | 587 | 581 |
| 0.5   | -3          | -39         | -2  | 76  | 158 | 290 | 404 | 535 | 620            | 615 | 609 | 597 | 590 | 587 | 580 |
| 1     | -5          | -38         | -2  | 76  | 159 | 291 | 405 | 535 | 620            | 615 | 608 | 597 | 590 | 587 | 580 |
| 2.25  | -8          | -38         | -1  | 77  | 161 | 292 | 406 | 537 | 620            | 615 | 608 | 597 | 590 | 587 | 579 |
| 4     | -13         | -38         | 0   | 79  | 162 | 293 | 408 | 538 | 620            | 615 | 608 | 597 | 590 | 586 | 578 |
| 6.25  | -18         | -37         | 0   | 80  | 163 | 295 | 409 | 540 | 620            | 615 | 607 | 596 | 590 | 586 | 578 |
| 9     | -22         | -37         | 1   | 81  | 165 | 296 | 410 | 541 | 620            | 614 | 607 | 596 | 590 | 585 | 577 |
| 12.25 | -25         | -37         | 1   | 81  | 166 | 297 | 412 | 542 | 620            | 614 | 607 | 596 | 590 | 585 | 577 |
| 16    | -27         | -36         | 2   | 82  | 167 | 298 | 413 | 543 | 620            | 614 | 606 | 596 | 590 | 584 | 576 |
| 20.25 | -31         | -36         | 3   | 83  | 168 | 299 | 414 | 544 | 620            | 613 | 606 | 596 | 589 | 584 | 575 |
| 25    | -29         | -36         | 3   | 83  | 169 | 300 | 415 | 546 | 620            | 613 | 606 | 596 | 589 | 583 | 574 |
| 40    | -33         | -35         | 5   | 85  | 172 | 303 | 418 | 548 | 620            | 613 | 605 | 596 | 589 | 583 | 573 |
| 60    | -35         | -34         | 7   | 87  | 175 | 306 | 421 | 551 | 620            | 613 | 605 | 595 | 589 | 583 | 572 |
| 90    | -37         | -33         | 9   | 90  | 179 | 308 | 425 | 555 | 620            | 613 | 605 | 595 | 589 | 582 | 571 |
| 120   | -39         | -32         | 11  | 92  | 181 | 310 | 431 | -   | 620            | 613 | 605 | 594 | 589 | 582 | 571 |
| 180   | -40         | -31         | 13  | 95  | 186 | 313 | -   | -   | 620            | 613 | 605 | 593 | 589 | 582 | 571 |
| 480   | -41         | -27         | -   | -   | -   | 330 | -   | -   | 620            | 613 | 605 | 592 | 589 | 582 | 571 |
| 1440  | -41         | -23         | 33  | 120 | 224 | 355 | 462 | -   | 620            | 613 | 605 | 592 | 589 | 582 | 571 |
| 2880  |             | -19         | 40  | 130 | 237 | 370 | -   | 617 |                |     |     |     |     |     |     |
| 4320  |             | -           | 45  | 138 | 247 | -   | 495 | 624 |                |     |     |     |     |     |     |
| 5760  |             | -           | 47  | -   | -   | -   | 504 |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 7200  |             | -13         | -   | -   | -   | -   | -   |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 8640  |             | -12         | -   | 149 | 261 | 391 | -   |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 10080 |             | -10         | 53  | 150 | 264 |     | 517 |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 11520 |             | -           | 55  |     | 266 |     | 521 |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 12960 |             | -           | 56  |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 14400 |             | -           | 58  |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 15840 |             | -           | -   |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 17280 |             | -6          | -   |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 18720 |             |             | -   |     | 274 |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 20160 |             |             | -   |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 21600 |             |             | 66  |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 23040 |             |             |     |     | 278 |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 24480 |             |             |     |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 25920 |             |             |     |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |
| 27360 |             |             |     |     | -   |     |     |     |                |     |     |     |     |     |     |

|                              |           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>28800</b>                 |           |      |      |      | 281  |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>30240</b>                 |           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>Total</b>                 | -41       | -6   | 66   | 150  | 281  | 391  | 521  | 624  | 620  | 613  | 605  | 592  | 589  | 582  | 571  |
| <b>Altura probeta [mm]</b>   | 30.41     | 30.1 | 29.3 | 28.5 | 27.2 | 26.1 | 24.8 | 23.8 | 23.8 | 23.9 | 24   | 24.1 | 24.1 | 24.2 | 24.3 |
| <b>Volumen probeta [cm3]</b> | 121.07829 | 120  | 117  | 113  | 108  | 104  | 98.7 | 94.6 | 94.8 | 95   | 95.4 | 95.9 | 96   | 96.3 | 96.7 |
| <b>Índice vacíos</b>         | 0.93      | 0.90 | 0.86 | 0.81 | 0.72 | 0.65 | 0.57 | 0.51 | 0.51 | 0.51 | 0.52 | 0.53 | 0.53 | 0.53 | 0.54 |
| <b>humedad</b>               | 35%       | 34%  | 32%  | 30%  | 27%  | 25%  | 22%  | 19%  | 19%  | 19%  | 20%  | 20%  | 20%  | 20%  | 20%  |

**Tabla 123: Datos de consolidación edométrica, Muestra 2**

| Tiempo [Min] | Saturación | Carga [Kg/cm2] |     |      |     |      |     |     |     | Descarga [Kg/cm2] |     |      |      |      |     |   |
|--------------|------------|----------------|-----|------|-----|------|-----|-----|-----|-------------------|-----|------|------|------|-----|---|
|              |            | 0.1            | 0.2 | 0.5  | 1   | 2    | 4   | 8   | 4   | 2                 | 1   | 0.5  | 0.25 | 0.1  | 0   |   |
|              |            | Carga [kPa]    |     |      |     |      |     |     |     | Descarga [kPa]    |     |      |      |      |     |   |
|              |            | 0              | 9.8 | 24.5 | 49  | 98.1 | 196 | 392 | 784 | 392               | 196 | 98.1 | 49   | 24.5 | 9.8 | 0 |
| <b>0</b>     | 0          | 212            | 322 | 412  | 492 | 572  | 652 | 730 | 805 | 802               | 797 | 792  | 783  | 778  | 773 |   |
| <b>0.1</b>   | 6          | 250            | 354 | 445  | 530 | 615  | 697 | 777 | 802 | 798               | 794 | 783  | 779  | 776  | 772 |   |
| <b>0.25</b>  | 15         | 265            | 363 | 455  | 538 | 622  | 704 | 784 | 802 | 798               | 794 | 783  | 779  | 776  | 772 |   |
| <b>0.5</b>   | 26         | 273            | 375 | 463  | 545 | 628  | 710 | 788 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | 776  | 771 |   |
| <b>1</b>     | 37         | 282            | 385 | 471  | 554 | 634  | 715 | 792 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | 776  | 771 |   |
| <b>2.25</b>  | 60         | 290            | 396 | 480  | 560 | 639  | 719 | 795 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | 776  | 771 |   |
| <b>4</b>     | 82         | 314            | 400 | 483  | 563 | 642  | 721 | 796 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | -    | 771 |   |
| <b>6.25</b>  | 107        | 316            | 402 | 485  | 565 | 643  | 722 | 797 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | -    | 770 |   |
| <b>9</b>     | 138        | 316            | 403 | 486  | 565 | 644  | 723 | 798 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | -    | 770 |   |
| <b>12.25</b> | 164        | 316            | 404 | 486  | 566 | 644  | 724 | 798 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | -    | 770 |   |
| <b>16</b>    | 194        | 317            | 405 | 487  | 566 | 645  | 724 | 799 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | 776  | 770 |   |
| <b>20.25</b> | 209        | 317            | 405 | 487  | 567 | 645  | 725 | 799 | 802 | 798               | 793 | 783  | 779  | 776  | 770 |   |
| <b>25</b>    | 210        | 317            | 406 | 487  | 567 | 645  | 725 | 800 | 802 | 798               | 792 | -    | 779  | 776  | 770 |   |
| <b>40</b>    | 210        | 317            | 406 | 488  | 568 | 646  | 725 | 800 | 802 | 797               | 792 | -    | 779  | 776  | 769 |   |
| <b>60</b>    | 211        | 318            | 407 | 489  | 568 | 647  | 726 | 801 | 802 | 797               | 792 | 783  | 779  | 776  | -   |   |
| <b>90</b>    | 211        | 318            | 407 | 489  | 569 | 647  | 726 | 801 | 802 | 797               | 792 | 783  | 779  | 776  | -   |   |
| <b>120</b>   | 211        | 318            | 408 | 490  | 569 | 647  | 727 | 801 | 802 | 797               | 792 | 783  | 779  | 776  | 764 |   |
| <b>180</b>   | 211        | 319            | 408 | 490  | 570 | 648  | 727 | 802 | 802 | 797               | 792 | -    | 779  | 776  |     |   |
| <b>480</b>   | 211        | 320            | -   | -    | 571 | -    | -   | -   | -   | 797               | 792 | 783  | 778  | 776  |     |   |
| <b>1440</b>  | 212        | 320            | 410 | 492  | 572 | 650  | 729 | 804 | 802 | 797               | 792 | -    | 778  | -    |     |   |
| <b>2880</b>  |            | 321            | -   | 492  | -   | 651  | 730 | -   |     |                   |     | -    |      | -    |     |   |
| <b>4320</b>  |            | -              | -   |      | -   | 651  |     | -   |     |                   |     | 783  |      | -    |     |   |
| <b>5760</b>  |            | -              | -   |      |     | -    |     | 805 |     |                   |     |      |      | -    |     |   |
| <b>7200</b>  |            | 322            | -   |      |     | -    |     | 805 |     |                   |     |      |      | 773  |     |   |
| <b>8640</b>  |            | 322            | 412 |      |     | -    |     |     |     |                   |     |      |      |      |     |   |
| <b>10080</b> |            |                |     |      |     | -    |     |     |     |                   |     |      |      |      |     |   |
| <b>11520</b> |            |                |     |      |     | 652  |     |     |     |                   |     |      |      |      |     |   |

|                              |           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|------------------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 12960                        |           |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| <b>Total</b>                 | 212       | 322  | 412  | 492  | 572  | 652  | 730  | 805  | 802  | 797  | 792  | 783  | 778  | 773  | 764  |
| <b>Altura probeta [mm]</b>   | 27.88     | 26.8 | 25.9 | 25.1 | 24.3 | 23.5 | 22.7 | 22   | 22   | 22   | 22.1 | 22.2 | 22.2 | 22.3 | 22.4 |
| <b>Volumen probeta [cm3]</b> | 111.00502 | 107  | 103  | 99.9 | 96.7 | 93.5 | 90.4 | 87.4 | 87.5 | 87.7 | 87.9 | 88.3 | 88.5 | 88.7 | 89   |
| <b>Índice vacíos</b>         | 0.86      | 0.79 | 0.73 | 0.68 | 0.62 | 0.57 | 0.52 | 0.47 | 0.47 | 0.47 | 0.48 | 0.48 | 0.48 | 0.49 | 0.49 |
| <b>humedad</b>               | 33%       | 30%  | 28%  | 26%  | 24%  | 22%  | 20%  | 18%  | 18%  | 18%  | 18%  | 18%  | 19%  | 19%  | 19%  |

**Tabla 124: Datos de consolidación edométrica, Muestra 3**

| Tiempo [Min] | Saturación | Carga [Kg/cm2] |       |       |       |        |        |        | Descarga [Kg/cm2] |        |       |       |       |       |     |
|--------------|------------|----------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-----|
|              |            | 0.1            | 0.2   | 0.5   | 1     | 2      | 4      | 8      | 4                 | 2      | 1     | 0.5   | 0.2   | 0.1   | 0   |
|              |            | Carga [kPa]    |       |       |       |        |        |        | Descarga [kPa]    |        |       |       |       |       |     |
|              | 0          | 9.806          | 24.52 | 49.03 | 98.06 | 196.12 | 392.24 | 784.48 | 392.24            | 196.12 | 98.06 | 49.03 | 24.52 | 9.806 | 0   |
| <b>0</b>     | 0          | -22            | 10    | 90    | 185   | 306    | 443    | 576    | 693               | 687    | 681   | 673   | 665   | 656   | 648 |
| <b>0.1</b>   | 0          | -21            | 15    | 98    | 196   | 318    | 460    | 589    | 688               | 682    | 677   | 670   | 660   | 655   | 647 |
| <b>0.25</b>  | 1          | -21            | 17    | 99    | 198   | 320    | 463    | 591    | 688               | 682    | 677   | 670   | 660   | 655   | 646 |
| <b>0.5</b>   | 2          | -20            | 18    | 100   | 199   | 323    | 465    | 592    | 688               | 682    | 677   | 670   | 660   | 654   | 646 |
| <b>1</b>     | 3          | -20            | 18    | 101   | 202   | 325    | 468    | 594    | 688               | 682    | 677   | 670   | 660   | 653   | 645 |
| <b>2.25</b>  | 4          | -20            | 20    | 104   | 205   | 328    | 471    | 598    | 688               | 682    | 677   | 670   | 660   | 653   | 644 |
| <b>4</b>     | 5          | -19            | 22    | 106   | 207   | 333    | 474    | 601    | 688               | 682    | 677   | 670   | 659   | 652   | 643 |
| <b>6.25</b>  | 3          | -18            | 23    | 107   | 210   | 343    | 477    | 603    | 688               | 681    | 676   | 669   | 659   | 651   | 642 |
| <b>9</b>     | -1         | -18            | 24    | 109   | 213   | 348    | 480    | 605    | 687               | 681    | 675   | 669   | 658   | 651   | 640 |
| <b>12.25</b> | -7         | -17            | 25    | 111   | 215   | 355    | 483    | 608    | 687               | 681    | 675   | 668   | 657   | 650   | 639 |
| <b>16</b>    | -10        | -17            | 27    | 112   | 218   | 361    | 485    | 610    | 687               | 681    | 674   | 668   | 657   | 649   | 638 |
| <b>20.25</b> | -13        | -16            | 28    | 114   | 220   | 365    | 487    | 613    | 687               | 681    | 674   | 668   | 656   | 649   | 638 |
| <b>25</b>    | -19        | -15            | 29    | 115   | 222   | 372    | 490    | 616    | 687               | 681    | 674   | 668   | 655   | 649   | 637 |
| <b>40</b>    | -21        | -14            | 32    | 119   | 227   | 377    | 496    | 620    | 687               | 681    | 673   | 667   | 654   | 648   | 636 |
| <b>60</b>    | -22        | -13            | 35    | 123   | 233   | 382    | 500    | 625    | 687               | 681    | 673   | 667   | 653   | 648   | 636 |
| <b>90</b>    | -22        | -12            | 38    | 128   | 240   | 386    | 508    | 631    | 687               | 681    | 673   | 667   | 652   | 648   | 635 |
| <b>120</b>   | -22        | -11            | 41    | 131   | 244   | 391    | 511    | 635    | 687               | 681    | 673   | 667   | 651   | 648   | 635 |
| <b>180</b>   | -22        | -              | 45    | 138   | 252   | 394    | 518    | 640    | 687               | 681    | 673   | 667   | 650   | 648   | 635 |
| <b>480</b>   | -22        | 3              | -     | 152   | 267   | 405    | 556    | 664    | 687               | 681    | 673   | 667   | 648   |       |     |
| <b>1440</b>  | -22        | 10             | 70    | 172   | 295   | 418    | 576    | 685    | 687               | 681    | 673   | 667   | 648   |       |     |
| <b>2880</b>  |            | -              | 185   | 306   | 433   |        | 693    |        |                   |        |       |       |       |       |     |
| <b>4320</b>  |            | -              |       |       | 443   |        |        |        |                   |        |       |       |       |       |     |

|      |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|------|--|--|----|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 5760 |  |  | 90 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 7200 |  |  |    |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

### 8.9 ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA

Los ángulos de fricción interna se miden de las siguientes imágenes.

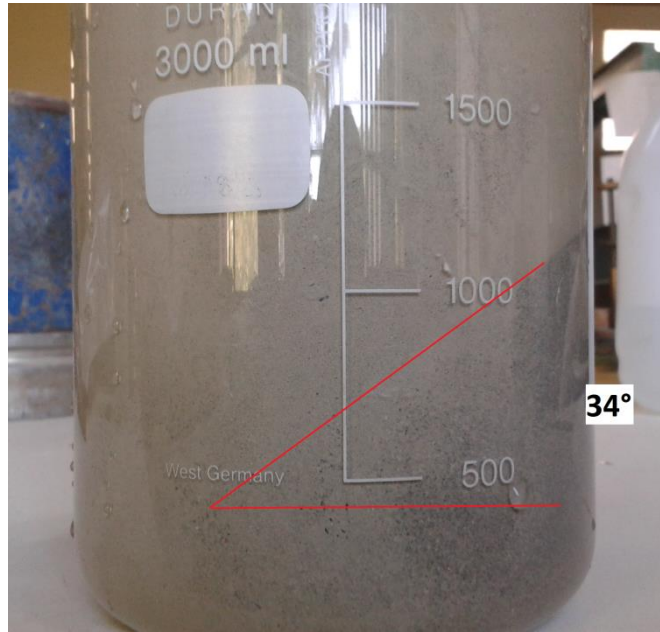


Figura 14: Imagen para determinar ángulo de fricción interna. Muestra 1

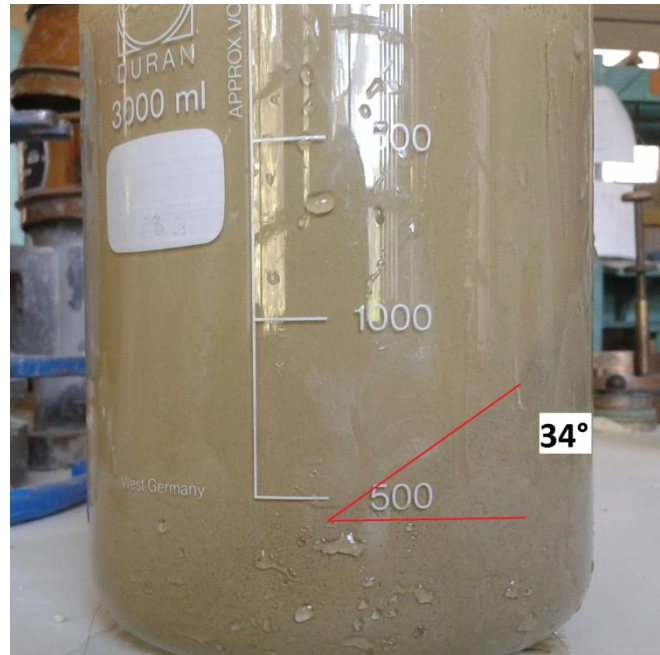


Figura 15: Imagen para determinar ángulo de fricción interna. Muestra 2

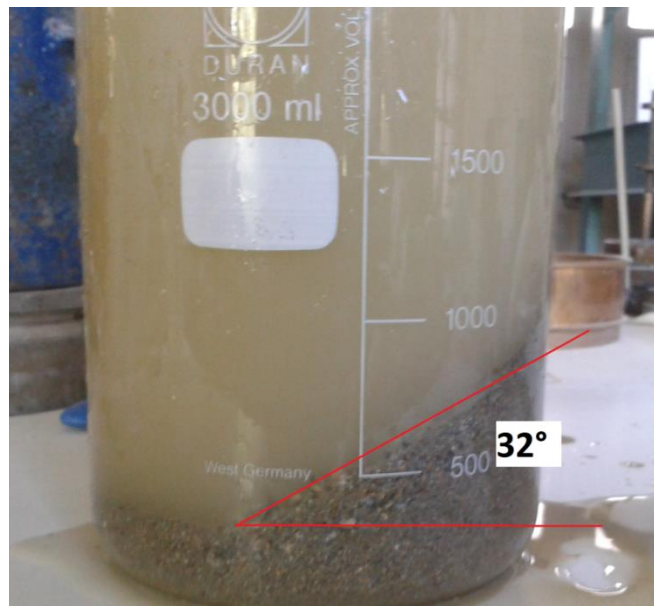


Figura 16: Imagen para determinar ángulo de fricción interna. Muestra 3

## 8.10 ASENTAMIENTO Y EXTENSIÓN DE FLUJO

Tabla 125: Datos asentamiento y extensión de flujo, Muestra 1

| Dr   | Saturación | Asentamiento [cm] | Humedad [%] | Diámetro final [cm] | Variación diámetro | tiempo [seg] (50cm) |
|------|------------|-------------------|-------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 45 % | 60%        | 16.5              | 13.3%       | 37                  | 17                 | -                   |
|      | 80%        | 18                | 17.8%       | 39                  | 19                 | -                   |
|      | 100%       | 24                | 22.2%       | 58                  | 38                 | 1                   |
| 65 % | 60%        | 0                 | 10.6%       | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 80%        | 2.5               | 14.1%       | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 100%       | 9.5               | 17.6%       | 39                  | 19                 | -                   |
| 85 % | 60%        | 0                 | 7.8%        | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 80%        | 0                 | 10.4%       | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 100%       | 0                 | 13.1%       | 20                  | 0                  | -                   |

Tabla 126: Datos asentamiento y extensión de flujo, Muestra 2

| Dr   | Saturación | Asentamiento [cm] | Humedad [%] | Diámetro final [cm] | Variación diámetro [cm] | tiempo [seg] (50cm) |
|------|------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------------------|---------------------|
| 45 % | 60%        | 0.5               | 15.2%       | 20                  | 0                       | -                   |
|      | 80%        | 8                 | 20.2%       | 30                  | 10                      | -                   |
|      | 100%       | 24                | 25.3%       | 51                  | 31                      | 10                  |
| 65 % | 60%        | 0                 | 11.9%       | 20                  | 0                       | -                   |
|      | 80%        | 9                 | 15.9%       | 23                  | 3                       | -                   |
|      | 100%       | 20                | 19.9%       | 34                  | 14                      | -                   |
| 85 % | 60%        | 0                 | 8.7%        | 20                  | 0                       | -                   |
|      | 80%        | 0                 | 11.6%       | 20                  | 0                       | -                   |
|      | 100%       | 1                 | 14.5%       | 20                  | 0                       | -                   |
|      |            |                   |             |                     |                         |                     |

Tabla 127: Datos asentamiento y extensión de flujo, Muestra 3

| Dr   | Saturación | Asentamiento [cm] | Humedad [%] | Diámetro final [cm] | Variación diámetro | tiempo [seg] (50cm) |
|------|------------|-------------------|-------------|---------------------|--------------------|---------------------|
| 45 % | 60%        | 0                 | 13.5%       | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 80%        | 18                | 18.0%       | 35                  | 15                 | -                   |
|      | 100%       | 21                | 22.5%       | 43                  | 23                 | -                   |
| 65 % | 60%        | 0                 | 10.4%       | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 80%        | 3                 | 13.9%       | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 100%       | 15                | 17.4%       | 32                  | 12                 | -                   |
| 85 % | 60%        | 0                 | 7.3%        | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 80%        | 0                 | 9.8%        | 20                  | 0                  | -                   |
|      | 100%       | 0                 | 12.2%       | 20                  | 0                  | -                   |

aa