



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Amortiguamiento en suelos compactados

Trabajo realizado por:

Jorge Poucell Mier y Terán

Dirigido por:

Antonio Lloret Morancho

Enrique Romero Morales

Master en:

Ingeniería del Terreno

Barcelona, a 23 de septiembre del 2016

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

TRABAJO FINAL DE MASTER

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA

ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR D'ENGINYERS
DE CAMINS, CANALS I PORTS DE BARCELONA



DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

AMORTIGUAMIENTO EN SUELOS COMPACTADOS

**TESINA DE MASTER
EN INGENIERÍA GEOTÉCNICA**

Autor: Jorge Poucell Mier y Terán

Tutor: Antonio Lloret Morancho

Enrique Romero Morales

A mis padres

Resumen

Los ensayos de laboratorio son muy importantes en la ingeniería geotécnica ya que en ellos se pueden conocer el comportamiento del suelo a pequeña escala. Y desde ese punto de vista, poder saber aquellos parámetros que definen al suelo.

Es por eso que, en este trabajo final de master, se estudia el efecto del grado de saturación en el factor de amortiguamiento de los suelos compactados. Para lograr esto, se hicieron pruebas de laboratorio en probetas con dos densidades secas impuestas, utilizando el método de compactación estática, en la arcilla limosa del llano de Barcelona. Así mismo, se obtuvieron diferentes grados de saturación por medio de diferentes humedades impuestas también.

Las pruebas de laboratorio radicaron en someter las probetas a una tensión de confinamiento, y ensayarlas en el aparato de columna resonante. Así, se pudieron conocer los parámetros dinámicos del suelo a pequeñas deformaciones.

Las probetas que se ensayaron en laboratorio fueron manufacturadas con las densidades secas de 1.65 Mg/m^3 y 1.75 Mg/m^3 , y fueron sometidas a una tensión de confinamiento de 200 kPa. Estas muestras tenían un grado de saturación que iba desde el 20% hasta el 100% aproximadamente, utilizando humedades en el material en un rango del 5% al 24%.

Se hizo un análisis de los resultados obtenidos, y estos demostraron que la rigidez del suelo aumenta a medida que aumenta la densidad seca, por lo contrario, el factor de amortiguamiento decrece con el aumento de la densidad seca. También se demostró que el módulo de corte disminuye a medida que aumenta el grado de saturación del suelo y, por otro lado, el factor de amortiguamiento aumenta con el aumento del grado de saturación. Se comprobó, al menos para las muestras con densidad seca de 1.75 Mg/m^3 , que el módulo del cambio en la tensión de confinamiento en función de la deformación disminuye ante el aumento del grado de saturación del suelo.

Para finalizar, y como era de esperarse, el módulo edométrico disminuyó al aumentar la saturación del material, siguiendo una tendencia exponencial, al menos entre el 20% y el 80% de la saturación. Se corroboró también que, para un mismo nivel de saturación, el módulo edométrico es mayor para las muestras con una densidad seca mayor.

Abstract

Laboratory tests are very important in geotechnical engineering, because in them it can be known the soil behavior at small scale. And from that point of view, it can be learned those parameters that define the soil.

That's why, in this thesis, the effect of saturation degree in damping ratio of compacted soil is studied. To archive this, laboratory tests were performed in soil samples with two imposed dry densities, using the static compaction method in Barcelona's silty clay. Meanwhile, different saturation degrees were obtained by different water content imposed as well.

Laboratory tests consist on submit soil samples in a confinement stress, and test them in the resonant column. Thus, it can be known the dynamic soil parameters for small deformations.

Soil samples were tested in laboratory by manufacturing them with dry densities of 1.65 Mg/m^3 and 1.75 Mg/m^3 , and they were submitted to confinement stress of 200 kPa. These samples had saturation degree ranging from 20% to 100% approximately, using a material water content in range of 5% to 24%.

An analysis of the obtained results was made, and showed that soil stiffness increases with increasing dry density, on the other hand, the damping ratio decreases with increasing dry density. It was also shown that the shear modulus decreases with increasing the saturation degree on soil, in consequence the damping ratio increases with increasing the saturation degree. It was found, at least for the soil samples with dry density of 1.75 Mg/m^3 , that the confinement stress in function of deformation modulus decreases with the increasing saturation degree.

Finally, as was expected, the oedometer modulus decreased with increasing material saturation, following an exponential trend, at least between 20% and 80% of saturation. It was also confirmed that, for the same level of saturation, the oedometer modulus is higher for samples with higher dry density.

Índice

Resumen	4
Abstract.....	5
Índice	6
Lista de figuras	8
Lista de tablas	12
1. Introducción	13
2. Objetivo.....	14
2.1. Objetivo general.....	14
2.2. Objetivos específicos	14
2.3. Metodología experimental	15
3. Antecedentes	17
3.1. Dinámica de suelos	17
3.1.1. Propiedades dinámicas del suelo	19
3.1.2. Factores que influyen en las propiedades dinámicas del suelo	24
3.2. Suelos compactados.....	28
3.3. Trabajos realizados previamente en la UPC	32
4. Material utilizado	37
5. Equipo utilizado en laboratorio	41
5.1. Columna resonante	41
5.2. Principios de su funcionamiento.....	44
6. Metodología del ensayo	49
6.1. Preparación del material	49
6.2. Compactación de la probeta.....	54

6.3.	Aplicación de la carga de 200 kPa en el equipo de columna resonante	62
6.4.	Ensayo de la probeta en el equipo de columna resonante.....	72
6.5.	Cronograma de una semana de laboratorio.....	75
7.	Resultados	78
8.	Análisis de los resultados	90
9.	Conclusiones	93
10.	Futuras líneas de investigación.....	94
11.	Referencias	95
12.	Anexos.....	98

Lista de figuras

Figura 1. Curva módulo de corte-deformación (Atkinson & Salfords, 1991).....	18
Figura 2. Curva de histéresis, deformación de corte γ – tensión de corte τ y definición del módulo de corte máximo G_{max} , tangente G_{tan} y secante G_{sec} . La tensión τ se expresa en kPa y la deformación γ es adimensional y se expresa en %. (Hardin & Drnevich, 1972)	20
Figura 3. Módulo de corte normalizado por el módulo de corte máximo y factor de amortiguamiento del modelo hiperbólico (Lloret, 2012).....	21
Figura 4. Cambios en el comportamiento de los suelos con respecto a la deformación de corte aplicada y los modelos correspondientes a utilizar (Kramer, 1996)	22
Figura 5. Clasificación de los problemas de carga según el número de ciclos y con respecto al tiempo de duración (Lloret, 2012)	23
Figura 6. Variación del módulo de corte en función de la tensión de confinamiento, del índice de plasticidad y de la deformación de corte. (Ishibashi, 1992).....	25
Figura 7. Variación del módulo de corte en función del grado de sobreconsolidación del suelo, del índice de plasticidad y de la deformación de corte (Vucetic & Dobry, 1991)	26
Figura 8. Variación del factor de amortiguamiento en función del índice de plasticidad, el grado de sobreconsolidación del suelo y la deformación de corte (Vucetic & Dobry, 1991)	27
Figura 9. Microfotografías obtenidas con el equipo SEM (Suriol & Lloret, 2007)	29
Figura 10. Definición del grado de saturación efectivo (Alonso, et al., 2013).....	30
Figura 11. Efecto del parámetro n_{smooth} en el grado de saturación efectivo para $\xi_m = 0.3$ (Alonso, et al., 2013).....	32
Figura 12. Material de estudio del llano de Barcelona	37
Figura 13. Material natural del llano de Barcelona	38
Figura 14. Gráfica granulométrica del material natural	40
Figura 15. Probeta sólida con vibración torsional (Díaz Rodríguez, 2005)	41
Figura 16. Sistema mecánico del dispositivo (Suriol Castellví, 1993).....	42

Figura 17. Rangos de deformación a corte en equipos de laboratorio (Dyvik, 2010).....	42
Figura 18. Esquema de la disposición de la instrumentación para el ensayo (Suriol Castellví, 1993)	43
Figura 19. Dispositivo tipo de un ensayo de columna de resonancia: (a) Vista superior del sistema de carga (b) Vista lateral del sistema de carga (Suriol Castellví, 1993) .	44
Figura 20. Deformación angular media (CIMNE-UPC-GEOLAB, 2014).....	45
Figura 21. Variación del módulo de corte normalizado con respecto a la deformación de corte normalizada en $\gamma 0.7$ (Santos & Correia, 2001)	48
Figura 22. Trituración del material con el mazo de goma.....	49
Figura 23. Tamiz número 10, abertura de 2 mm	50
Figura 24. Reutilización del material seco	50
Figura 25. Material tamizado para hacer las probetas	51
Figura 26. Material seco de una probeta con densidad de 1.65 Mg/m^3 , más 15% de abundamiento	51
Figura 27. Material seco con agua destilada	52
Figura 28. Incorporación del agua con el material seco	52
Figura 29. Material con humedad homogénea	53
Figura 30. Material con humedad homogénea empaquetado para reposar una noche	53
Figura 31. Control de humedades de cada probeta.....	54
Figura 32. Piezas utilizadas para la compactación de las probetas	55
Figura 33. Molde engrasado, listo para recibir material.....	55
Figura 34. Introducción del material húmedo en el molde de compactación.....	56
Figura 35. Material húmedo listo para ser metido en el horno.....	56
Figura 36. Prensa WF 5,000 kg	57
Figura 37. Calibración de la celda de carga de la prensa WF 5,000 kg	58
Figura 38. Compactación en marcha	58
Figura 39. Velocidades de desplazamiento de la prensa WF 5,000 kg	59
Figura 40. Probeta compactada lista para ensayo.....	60
Figura 41. Tensión de compactación estática de la muestra 8 y derivada de la tensión con respecto al tiempo	61
Figura 42. Muestra 17r en proceso de compactación	62

Figura 43. Probeta colocada en su lugar dentro del equipo de columna resonante	63
Figura 44. Cabezal colocado en su lugar listo para el ensayo	63
Figura 45. Membrana elástica y tubo para colocarla en la probeta	64
Figura 46. Membrana elástica colocada dentro del tubo	65
Figura 47. Colocación de la membrana elástica sobre la probeta	65
Figura 48. Probeta con membrana y ligas, lista para ser ensayada en la columna resonante	66
Figura 49. Base metálica y sistema de carga	67
Figura 50. Parte interna de la cámara con 3 puertos. Uno para LVDT y dos para la columna resonante	68
Figura 51. Cámara colocada en su lugar con cables conectados para obtener lecturas.....	68
Figura 52. Calibración del LVDT de la columna resonante.....	69
Figura 53. Célula de la columna resonante completa, con la tapa cerrada.....	70
Figura 54. Manómetro con la presión de 200 kPa.....	70
Figura 55. Curva de asiento - tiempo	71
Figura 56. Muestra 17r sumergida en agua para evitar pérdida de humedad.....	72
Figura 57. Partes del equipo de columna resonante. De arriba a abajo: acelerómetro, generador y osciloscopio.....	73
Figura 58. Valor pico-pico de la señal de excitación	73
Figura 59. Encontrando la frecuencia de resonancia.....	74
Figura 60. Amortiguamiento del material	75
Figura 61. Módulo de corte inicial G_0 en función de la densidad seca γ_d y la humedad w	79
Figura 62. Módulo de corte inicial G_0 en función del grado de saturación S_r , para muestras con densidades secas γ_d de 1.6 Mg/m^3 y 1.7 Mg/m^3	80
Figura 63. Módulo de corte G en función de la deformación de corte γ para muestras con densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3	80
Figura 64. Módulo de corte G en función de la deformación de corte γ para muestras con densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3	81
Figura 65. Factor de amortiguamiento máximo D_{max} en función de la densidad seca γ_d y la humedad w	82

Figura 66. Factor de amortiguamiento inicial D_0 en función de la densidad seca γ_d y la humedad w	82
Figura 67. Variación del factor de amortiguamiento D en función del grado de saturación S_r para una deformación de corte γ de $7E-03$ en muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3	83
Figura 68. Variación del factor de amortiguamiento D en función del grado de saturación S_r para una deformación de corte γ de $9E-04$ en muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3	83
Figura 69. Factor de amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ para muestras con densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3	84
Figura 70. Factor de amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ para muestras con densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3	84
Figura 71. Tensión de corte τ en función de la deformación de corte γ para muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3	85
Figura 72. Tensión de corte τ en función de la deformación de corte γ para muestras con una densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3	86
Figura 73. Tensión de corte τ del modelo hiperbólico, en función de la deformación de corte γ para muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3	86
Figura 74. Tensión de corte τ del modelo hiperbólico, en función de la deformación de corte γ para muestras con una densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3	87
Figura 75. Deformación de corte al 70% $\gamma_{0.7}$ en función de la densidad seca γ_d y la humedad w	88
Figura 76. Módulo $\Delta P/\varepsilon$ en función del grado de saturación S_r , para muestras con una densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3	88
Figura 77. Módulo edométrico E_m en función del grado de saturación S_r	89
Figura 78. Módulo de corte inicial G_0 en función del grado de saturación S_r , para muestras con densidades secas γ_d de 1.6 Mg/m^3	90
Figura 79. Variación del factor de amortiguamiento D en función del grado de saturación S_r , en muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3	91

Lista de tablas

Tabla 1. Factores que influyen en el módulo de corte (Díaz Rodríguez, 2005).....	25
Tabla 2. Factores que definen el comportamiento de los suelos frente a carga cíclica	27
Tabla 3. Granulometría del material natural utilizado.....	39
Tabla 4. Velocidad de desplazamiento de la prensa WF 5,000 kg.....	59
Tabla 5. Medidas tomadas del ensayo de columna resonante	75
Tabla 6. Cronograma de una semana de laboratorio	77
Tabla 7. Resumen de los parámetros calculados	78
Tabla 8. Resumen de los parámetros calculados	79

1. Introducción

Es de suma importancia, para las obras civiles, conocer la parte dinámica que afecta el comportamiento de los suelos y de las estructuras que se apoyan sobre estos. Es por ello, que este trabajo final de master, se centra en el conocimiento de aquellos parámetros que describen al suelo en su parte dinámica, y cómo afectan mecánicamente ante la saturación del suelo.

Para poder comenzar a hablar de este vasto tema, es importante identificar aquellas cargas cíclicas existentes en las obras civiles o producto de la naturaleza, como son: los sismos, las cimentaciones de maquinaria, la carga vehicular en carreteras o los movimientos inducidos por las actividades de explosivos. Cada una de ellas, se ubica en su propia escala cíclica y de intensidad, por lo que es importante estudiarlas para poder conocer su particular comportamiento.

Para lograr conocer dichos parámetros se utilizó el aparato de columna resonante el cual es descrito a detalle en el capítulo cinco, y la forma en la que este funciona. Es de interés resaltar que dicho aparato funciona con aire a presión para dar la tensión de confinamiento, la cual en este caso fue de 200 kPa.

Dentro de los equipos utilizados en laboratorio también se destaca la prensa WF 5,000 kg, la cual compacta el suelo de manera estática, dando por resultado estructuras de suelo floculadas incluso en la rama húmeda. Dicho equipo se utilizó para lograr las densidades secas de 1.65 Mg/m^3 y 1.75 Mg/m^3 para las muestras a ensayar.

En el capítulo seis, se describe paso a paso la metodología del ensayo llevado a cabo para lograr obtener el módulo de corte G y el factor de amortiguamiento D , desde la preparación del material, pasando por su compactación, hasta el ensayo en la columna resonante, de la arcilla limosa del llano de la ciudad de Barcelona.

Para finalizar, en el capítulo siete y ocho se muestran los resultados obtenidos de los trabajos de laboratorio descritos, y su correspondiente análisis.

2. Objetivo

En este apartado se define un objetivo general del trabajo final de master, unos objetivos específicos y una metodología experimental, para dar una idea general de lo que se busca lograr, mostrando información básica para poder alcanzar dichos objetivos.

2.1. Objetivo general

El objetivo primordial de este trabajo final de master es estudiar el efecto de la saturación en la rigidez y, especialmente, en el factor de amortiguamiento de un suelo compactado estáticamente. Para ello es necesario, obtener el módulo de corte G y el factor de amortiguamiento D , en función de la deformación de corte γ , en muestras con diversas humedades usando el equipo de columna resonante. Se han considerado dos diferentes densidades secas del material, que en este caso son 1.65 y 1.75 Mg/m³, bajo una presión de confinamiento de 200 kPa. El material utilizado es una arcilla limosa del llano de la ciudad de Barcelona.

2.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos o parciales para poder alcanzar el objetivo general propuesto son:

- Definir un procedimiento para obtener probetas con densidades secas y humedades especificadas de ante mano.
- Definir un procedimiento de ensayo en la columna resonante.
- Establecer un procedimiento de cálculo de los parámetros que definen la variación del módulo de corte y del factor de amortiguamiento con el nivel de deformación de la probeta.

- Analizar de forma conjunta los resultados obtenidos para adquirir pautas de comportamiento en la variación de los parámetros indicados con el grado de saturación.
- Proponer un modelo empírico basado en los resultados obtenidos para calcular el módulo y el factor de amortiguamiento teniendo en cuenta el grado de saturación del suelo.

2.3. Metodología experimental

El programa experimental constituye una parte importante del trabajo. A continuación, se describe la metodología seguida en esa parte:

1. Triturar con el mazo de goma y tamizar el material para quitar aquellas partículas mayores a 2 mm con la malla número 10.
2. Para la densidad seca de 1.65 Mg/m^3 , hallar su equivalente en peso seco de material y agregar agua destilada para obtener humedades del: 5%, 7%, 9%, 12%, 14%, 16%, 19% 22% y 25%. Siendo ésta última la probeta con saturación al 100%.
3. Para la densidad seca de 1.75 Mg/m^3 , hallar su equivalente en peso seco de material y agregar agua destilada para obtener humedades del: 7%, 9%, 12% y 16%.
4. Obtener el grado de saturación de todas las muestras.
5. Manufacturar probetas cilíndricas con dicho material húmedo, de 76 mm de alto y 38 mm de diámetro, utilizando el método de compactación estática.
6. Con la curva de compactación, conseguir el módulo edométrico E_m .
7. Montar las probetas en el aparato de columna resonante y someterlas a una presión de confinamiento de 200 kPa. Obtener con el LVDT el asentamiento de cada probeta y con ello su módulo $\frac{\Delta P}{\varepsilon}$.
8. Ensayar las probetas en el aparato de columna resonante y someterlas a carga cíclica, para obtener el valor pico-pico V_{pp} en Volts de la excitación, la frecuencia de resonancia f_r en Hz y el valor pico-pico V_{pp} en Volts de la respuesta. Una vez obtenida

la frecuencia de resonancia, se desconecta la excitación para poder medir el decaimiento de la amplitud del movimiento a lo largo de unos diez ciclos.

9. Con los valores mencionados, calcular el módulo de corte G y el amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ , y obtener los parámetros G_0 , $\gamma_{0.7}$, D_0 y D_{max} .
10. Graficar el módulo de corte G y el amortiguamiento D de todas las probetas para las diferentes densidades secas y en función de la deformación de corte γ .
11. Graficar la densidad seca en función de la humedad de todas las probetas para dibujar los parámetros G_0 , $\gamma_{0.7}$, D_0 y D_{max} .
12. Graficar G_0 , $\gamma_{0.7}$, D_0 , D_{max} , E_m y $\frac{\Delta P}{\varepsilon}$ en función del grado de saturación S_r .

3. Antecedentes

Los orígenes de la dinámica de suelos se remontan a Japón, en donde (Mononobe & Matsuo, 1929) publicaron su trabajo sobre la presión lateral sísmica, en tanto que (Saita & Suzuki, 1934) señalaron la importante relación entre el daño estructural y las condiciones locales del sitio. Los orígenes de la interacción dinámica suelo-estructura se encuentran en el trabajo de (Sezawa & Kanai, 1935) y la introducción del modelo de la viga de cortante para el análisis sísmico de presas de tierra se deben a (Mononobe, 1936)

A partir de 1950, los Estados Unidos de Norteamérica, se avocan al estudio del fenómeno de la propagación de ondas en el terreno asociada con explosiones nucleares, así como al diseño de la cimentación de antenas de radar. Se inicia también la medición de las propiedades dinámicas, lo que hizo necesario el diseño de equipo de laboratorio, así como de los procedimientos de ensaye correspondientes. En tanto que en Japón se investiga la relación entre los daños ocasionados por sismos y su relación con las condiciones locales y el desarrollo de algunas soluciones para el diseño sísmico de estructuras de tierra (Okamoto, 1973), pero fue a partir de 1964 cuando la investigación se intensificó a raíz de los daños que provocaron los sismos de Anchorage, Alaska (Seed, 1969), y Niigata, Japón (Seed & Lee, 1966) (Seed & Iddris, 1967), lo cual obligó a entender el comportamiento de las masas de suelo durante la ocurrencia de sismos y al desarrollo de soluciones para el diseño de plantas nucleares, plataformas fuera de costa y presas de tierra.

Desde entonces y a lo largo de más de cuatro décadas, la Dinámica de Suelos ha evolucionado ante la creciente necesidad de describir, explicar y predecir el comportamiento dinámico de los suelos y de las estructuras cimentadas sobre ellos. (Díaz Rodríguez, 2005)

3.1. Dinámica de suelos

La dinámica de suelos es la rama de la ingeniería civil que estudia el comportamiento y las propiedades del suelo bajo carga dinámica. Es por ello que la dinámica de suelos ha evolucionado como una disciplina independiente, sin embargo, ha necesitado de otros

campos del conocimiento como son: la mecánica de suelos, la dinámica estructural, la dinámica del medio continuo y la ingeniería sísmica.

Existen dos propiedades básicas de la dinámica de suelos, que son, el módulo de corte G y el factor de amortiguamiento D . Estas dos propiedades dinámicas del suelo se miden en función de la deformación de corte adimensional γ que se expresa en porcentaje.

Es conocido que la rigidez del suelo disminuye con la deformación, ello es debido a la no linealidad del comportamiento tenso-deformacional del suelo. Este hecho se pone de manifiesto, por ejemplo, en el caso de asientos causados por una cimentación superficial, donde se comprueba que lejos de la cimentación (por estar el suelo sometido a tensiones bajas) las deformaciones y asientos son menores que los predichos utilizando la teoría elástica lineal.

El conocimiento de la variación del módulo con la deformación permite la utilización de métodos de análisis no lineales, en los que el valor del módulo en cada punto se ajusta según su nivel de deformación en un proceso iterativo. Evidentemente la calidad de los resultados será mejor. (Suriol Castellví, 1993)

En la figura 1 se puede observar el comportamiento del módulo de corte G , en función de la deformación de corte γ , y los equipos que logran medir dicho parámetro según su nivel de deformación.

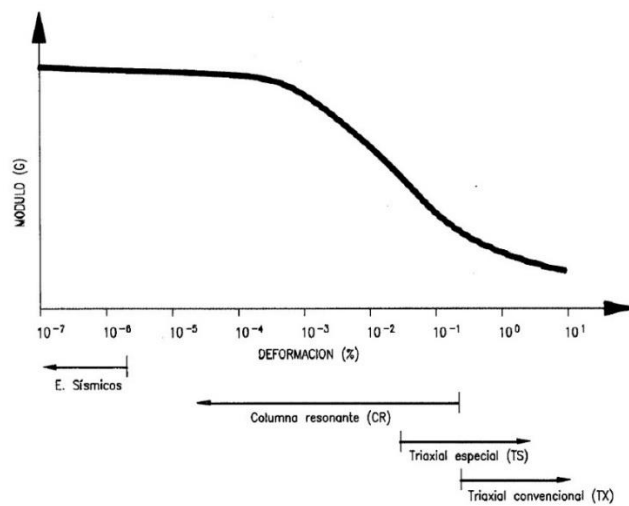


Figura 1. Curva módulo de corte-deformación (Atkinson & Salfords, 1991)

Existe un factor importante en la dinámica de suelos que es la resonancia, la cual se define como la suma de las amplitudes de una misma frecuencia, es decir, cuando una fuerza se aplica a un sistema repetidamente y la frecuencia de excitación es igual a la frecuencia natural del sistema, el resultado es la suma de las amplitudes que da como consecuencia el fenómeno de la resonancia. Dicho fenómeno, es capaz de derrumbar estructuras completas a bajas intensidades, debido a la suma de amplitudes en cada ciclo, llegando a deformaciones de gran valor.

3.1.1. Propiedades dinámicas del suelo

La sacudida provocada por un terremoto es una carga cíclica rápida que provoca en el suelo un comportamiento tenso-deformacional no lineal, como el que se enseña en la figura 2. Que corresponde a la curva de histéresis: deformación de corte γ , y tensión de corte τ . Las propiedades dinámicas más importantes son: el módulo de corte G y la razón de amortiguamiento D . El módulo de corte se define como la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado de la curva de la figura 2 y es una medida de la dureza del material. Se obtiene calculando la pendiente de la curva tensión – deformación y en función de dónde se evalúa está pendiente se distingue entre el módulo de corte tangente G_{tan} , secante G_{sec} o máximo G_{max} . En la figura 2 se ilustran dichos módulos: el módulo de corte máximo G_{max} , calculado como el valor de la pendiente de la recta tangente en el punto inicial de la curva, el módulo de corte tangente G_{tan} que es el valor de la pendiente en un punto de la curva y el módulo de corte secante G_{sec} que se calcula como la pendiente de la recta secante a la curva. El módulo de corte G está relacionado con el coeficiente de Poisson ν y el módulo de Young E según la ecuación 1.

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (1)$$

Esta ecuación es válida para materiales que tienen un comportamiento isótropo. El coeficiente de Poisson ν también es un parámetro dinámico, pero se considera que tiene una influencia menor. En condiciones drenadas el valor típico de este parámetro es 0.3 y en condiciones no drenadas toma el valor de 0.5. (Rodríguez Segurado, 2005)

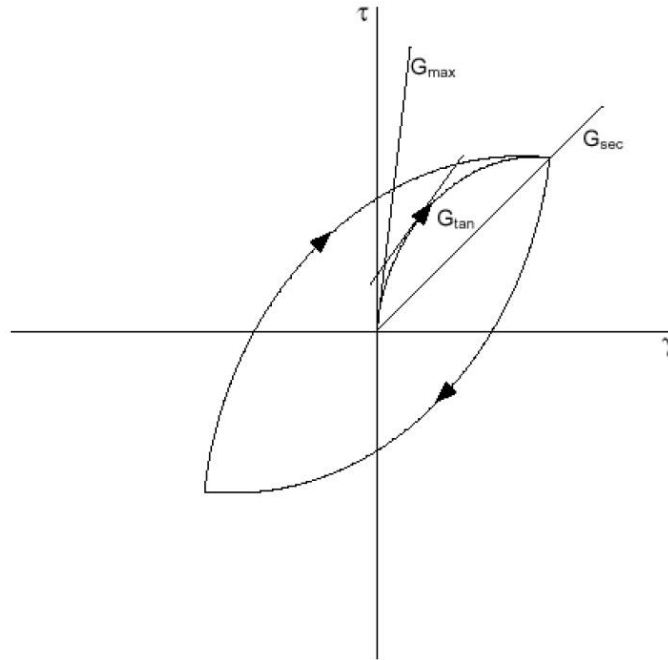


Figura 2. Curva de histéresis, deformación de corte γ – tensión de corte τ y definición del módulo de corte máximo G_{max} , tangente G_{tan} y secante G_{sec} . La tensión τ se expresa en kPa y la deformación γ es adimensional y se expresa en %. (Hardin & Drnevich, 1972)

Es común que se represente el módulo de corte G normalizado por el módulo de corte máximo G_{max} , a esta nueva curva se le conoce como “curva de reducción del módulo”, la cual se puede observar en la figura 3 como el modelo hiperbólico, y en ella se puede ver que el módulo de corte normalizado disminuye a medida que la deformación normalizada aumenta, así como el factor de amortiguamiento aumenta a medida que la deformación de corte normalizada aumenta también.

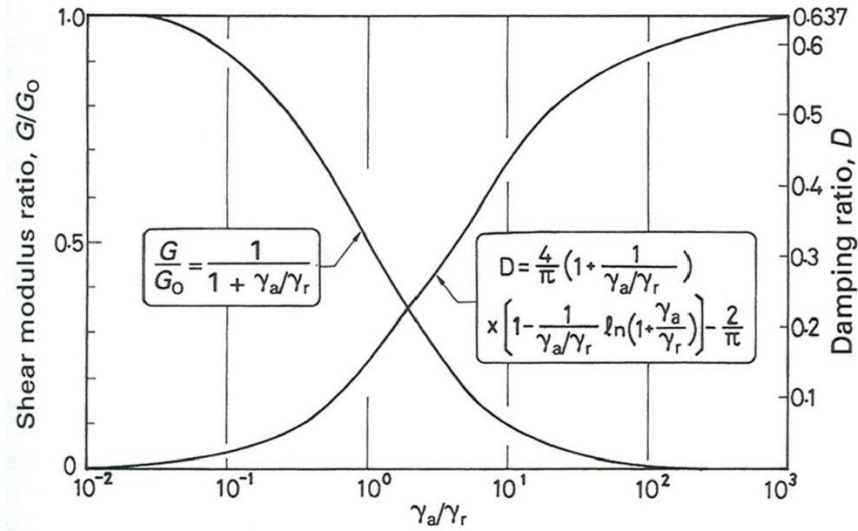


Figura 3. Módulo de corte normalizado por el módulo de corte máximo y factor de amortiguamiento del modelo hiperbólico (Lloret, 2012)

Es importante hacer notar que el comportamiento del suelo depende de la deformación de corte aplicada, es por eso que debe tenerse en cuenta el nivel de deformación en la que el suelo se encuentra, para poder decidir qué modelo es el más adecuado para su estudio, y qué parámetros son los que se encontrarán bajo ese tipo de comportamiento. En la figura 4 se hace notar las diferencias entre los comportamientos del suelo y sus niveles de deformación, teniendo en cuenta el tipo de modelo que es aconsejable utilizar.

Shear strain	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
	Small strain	Medium strain		Large strain	Failure strain	
Elastic						
Elasto-plastic						
Failure						
Effect of load repetition						
Effect of loading rate						
Model	Linear elastic model		Visco-elastic model		Load history tracing type model	
Method of response analysis	Linear method		Equivalent linear method		Step-by-step integration method	

Figura 4. Cambios en el comportamiento de los suelos con respecto a la deformación de corte aplicada y los modelos correspondientes a utilizar (Kramer, 1996)

En la figura 5 se hace notar los problemas de carga más comunes debido al número de ciclos de la misma con respecto a su tiempo de duración, y se puede ver que los problemas se clasifican como dinámicos o estáticos. Dentro de los problemas dinámicos, se encuentran, la detonación de explosivos, terremotos, compactación por pila, carga vehicular y cimentación de maquinaria. Así mismo, dentro de los problemas estáticos, se encuentran, estructuras temporales y permanentes, carga por estacionamientos de vehículos y carga por ondas inducidas.

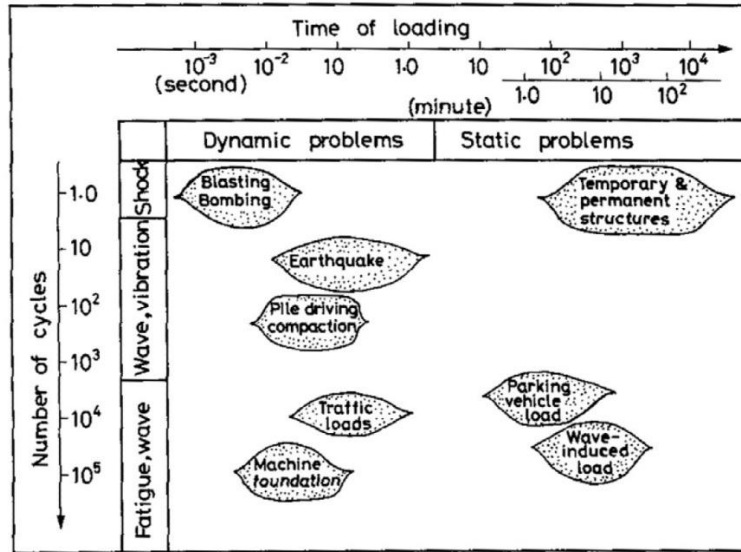


Figura 5. Clasificación de los problemas de carga según el número de ciclos y con respecto al tiempo de duración (Lloret, 2012)

Otra propiedad dinámica del suelo de la que no he hablado es el amortiguamiento D , y es el factor que indica la capacidad del material de disipar energía, el cual se calcula con la ecuación 2.

$$D = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_{lazo}}{G_{sec} \gamma_c^2} \quad (2)$$

Dónde

W_D = Energía disipada

W_S = Energía de deformación máxima

A_{lazo} = Área del lazo del ciclo de histéresis

G_{sec} = Módulo de corte secante

γ_c = Deformación de corte máxima

3.1.2. Factores que influyen en las propiedades dinámicas del suelo

Los factores que influyen en las propiedades dinámicas del suelo son:

- La tensión efectiva de confinamiento
- El nivel de tensiones del suelo
- El índice de poros
- La plasticidad del suelo

La tensión efectiva vertical está definida por la ecuación 3 como;

$$\sigma'_v = \rho z \quad (3)$$

Dónde

ρ = Peso específico del suelo

z = Profundidad medida desde la superficie

Por lo tanto, la tensión efectiva vertical aumenta con la profundidad y el material está más confinado. Un aumento en la tensión efectiva media provoca un aumento del límite de deformación elástica. En consecuencia, los suelos bajo tensiones de confinamiento altas se comportan como materiales más rígidos que suelos idénticos bajo tensiones de confinamiento menores. En la figura 6 se puede apreciar esto. Se ha observado que, para arcillas, el aumento en el índice de poros causa una disminución del módulo de corte y de la razón de amortiguamiento. (Rodríguez Segurado, 2005)

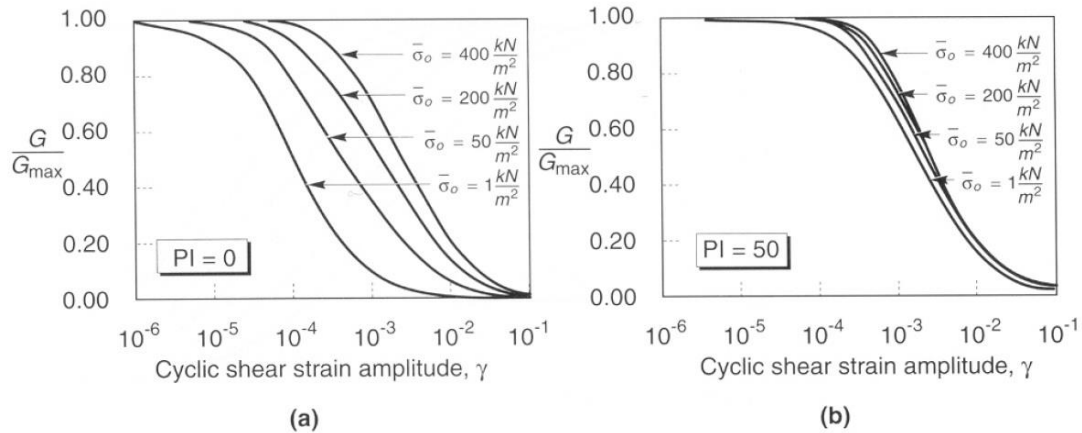


Figura 6. Variación del módulo de corte en función de la tensión de confinamiento, del índice de plasticidad y de la deformación de corte. (Ishibashi, 1992)

Se puede hacer notar también de la figura 6 que la variación del módulo de corte en función de la deformación de corte debido al aumento del índice de plasticidad es menor con respecto al aumento de la tensión media de confinamiento, que en el caso donde el índice de plasticidad es cero.

Por otro lado, el módulo de corte G , está en función de: la tensión normal efectiva octaédrica, la historia de vibración, el grado de saturación, la componente isotrópica del estado de esfuerzos, la granulometría y mineralogía, la amplitud y frecuencia de vibración, los efectos secundarios del tiempo, la estructura del suelo y la temperatura que no son considerados normalmente. (Hardin & Black, 1969)

En la tabla 1 se indican algunos de los factores que tienen relación con el aumento o decrecimiento con el módulo de corte.

Tabla 1. Factores que influyen en el módulo de corte (Díaz Rodríguez, 2005)

Aumento de:	G_{max}
Tensión efectiva	Aumenta
Índice de poros	Decrece
Edad geológica	Aumenta
Cementación	Aumenta
Sobreconsolidación	Aumenta
Índice de plasticidad	Pequeño aumento
Número de ciclos de carga	Aumenta en arenas

La disminución del módulo de corte con el aumento de la deformación es mayor cuando el índice de plasticidad IP del material aumenta, como se muestra en la figura 7. Para suelos ligeramente consolidados ($OCR > 1$) con alto índice de plasticidad, G_{max} aumenta. En cambio, para suelos normalmente consolidados ($OCR = 1$) si el índice de plasticidad crece, G_{max} permanece más o menos constante. Esta característica es muy importante, ya que puede influir en la manera en la que un depósito de suelo amplificará o aumentará los movimientos provocados por un terremoto.

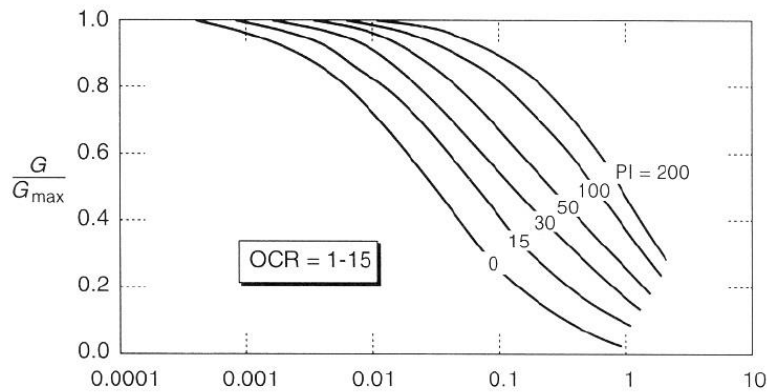


Figura 7. Variación del módulo de corte en función del grado de sobreconsolidación del suelo, del índice de plasticidad y de la deformación de corte (Vucetic & Dobry, 1991)

En el mismo estudio se mostró que, para índices de plasticidad elevados, el factor de amortiguamiento disminuye con el aumento de la deformación de corte. Esto se puede ver en la figura 8.

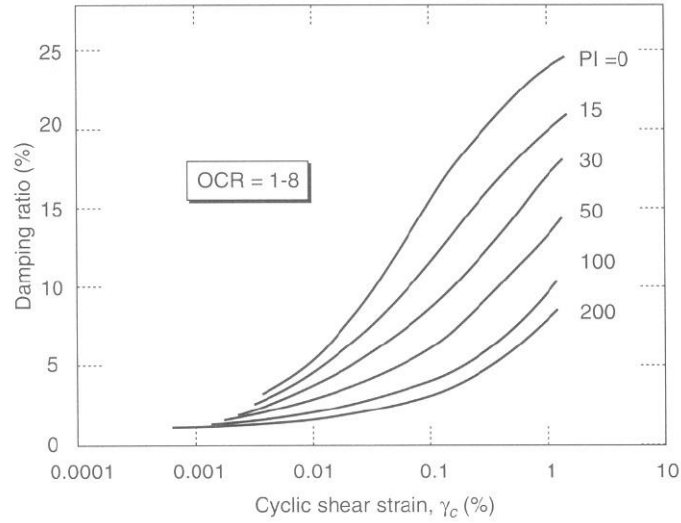


Figura 8. Variación del factor de amortiguamiento en función del índice de plasticidad, el grado de sobreconsolidación del suelo y la deformación de corte (Vucetic & Dobry, 1991)

Los factores que definen el comportamiento de los suelos frente a carga cíclica se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Factores que definen el comportamiento de los suelos frente a carga cíclica

Factor		
De carga		Del suelo
Deformación de corte		Índice de plasticidad
Tipo de carga	Regular	Índice de poros
	Uniforme	Edad geológica
Frecuencia-Velocidad de carga		Grado de cementación
		OCR
		Estado tensorial del suelo

Para finalizar, se enlista un resumen de los factores que afectan al módulo de corte G y al factor de amortiguamiento D .

- Índice de poros
- Grado de sobreconsolidación
- Cambio del grado de saturación
- Tensión de confinamiento
- Amplitud de la deformación de corte

- Índice de plasticidad

3.2. Suelos compactados

El método de compactación que se llevó a cabo en este trabajo final de master fue la compactación estática, en este apartado se recogen algunos aspectos que se consideran relevantes en relación al comportamiento del suelo ensayado.

Debido a que la compactación de suelos es un tema muy conocido en la actualidad, hablaré de la estructura de los suelos compactados en sus dos familias de poros y del grado de saturación efectivo de Alonso, Pinyol y Gens (2013)

La estructura alcanzada durante la compactación tiene influencia en el comportamiento mecánico posterior. Conviene, pues, prestar atención a las diferencias estructurales en vista a explicar comportamientos del suelo no explicables mediante las variables tensoriales. Es habitual considerar diferentes niveles de la estructura del suelo según el tamaño de poro asociado a cada nivel, dado que la distribución de los tamaños de poros en una probeta de suelo se considera una información muy relevante en la caracterización de la estructura. (Suriol & Lloret, 2007)

En el estudio de la estructura de los suelos es habitual distinguir entre dos niveles: microestructura y macroestructura; en este sentido, los resultados del ensayo de porosimetría permiten, a partir de la curva tamaño de poro vs volumen parcial asociado al mismo, identificar diferentes niveles de la estructura. De otra parte, la posibilidad de visualizar la geometría de la estructura mediante el uso de técnicas de Scanning Electron Microscope (SEM), permite identificar la tipología mayoritaria de entre las indicadas: de tipo floculado y de tipo disperso. Mediante un análisis apropiado de las imágenes digitalizadas, como las mostradas en la figura 9, pueden caracterizarse también las diferencias estructurales entre probetas en la rama seca (izquierda) y aquellas en la rama húmeda (derecha) (Suriol & Lloret, 2007).

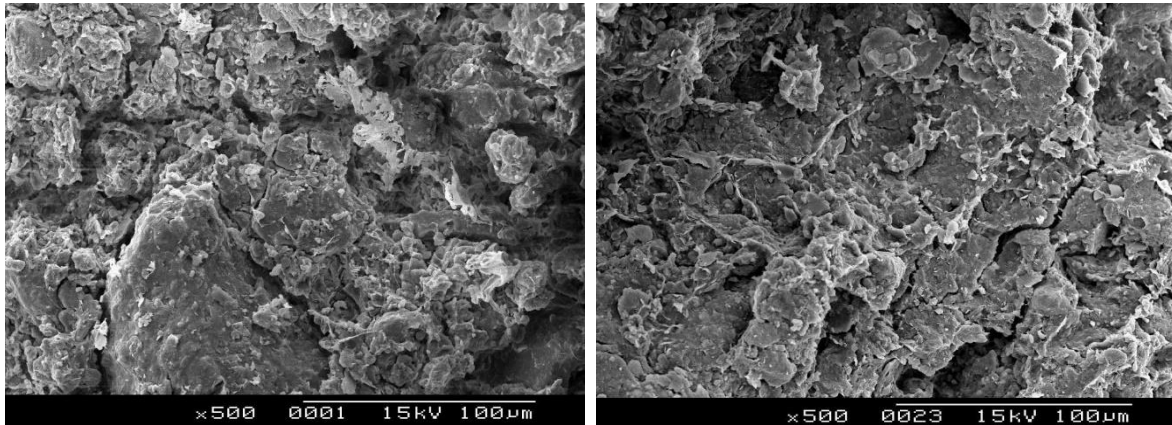


Figura 9. Microfotografías obtenidas con el equipo SEM (Suriol & Lloret, 2007)

La deformación volumétrica debido a la carga isotrópica da como resultado en la reducción del tamaño y volumen de los macroporos. Siendo que los microporos mantienen su volumen parcialmente y su tamaño.

La distribución del tamaño de poros se describe por una simple variable de estado, como se ve en la ecuación 4: la razón entre el índice de poros de la microestructura e_m , y el índice de poros total e . Esta razón se conoce como la variable de estado microestructural, ξ_m .

$$\xi_m = \frac{e_m}{e} \quad (4)$$

Si el agua tiene acceso a un suelo seco inicialmente compactado, se espera que la microestructura se sature primero, por la afinidad tan fuerte que tiene el agua con las plaquetas de la arcilla. Una vez que los microporos que se encuentran dentro de los agregados de la arcilla se saturan, cualquier exceso de agua ocupará los macroporos. (Alonso, et al., 2010) sugirió que solamente el agua que llena parcialmente los macroporos tendrá un efecto mecánico significativo en el suelo. El concepto detrás de esta idea está, en que el efecto de la capilaridad estará expuesta solo por el agua que forma meniscos entre los agregados y las partículas inertes del suelo.

El grado de saturación “efectivo”, en el sentido de la contribución a la tensión constitutiva, no toma valores de cero, solo para grados de saturación en exceso de ξ_m . El grado de saturación efectivo se asume para variar entre los valores de 0 y 1, cuando el S_r alcanza el espacio del macroporo ($\xi_m \leq S_r \leq 1$). Esto se puede ver en la figura 10 para el valor particular de $\xi_m = 0.4$. Los dibujos muestran la distribución asumida del agua en el micro y

macro volumen que ilustra dónde se localiza el agua cuando incrementa el grado de saturación.

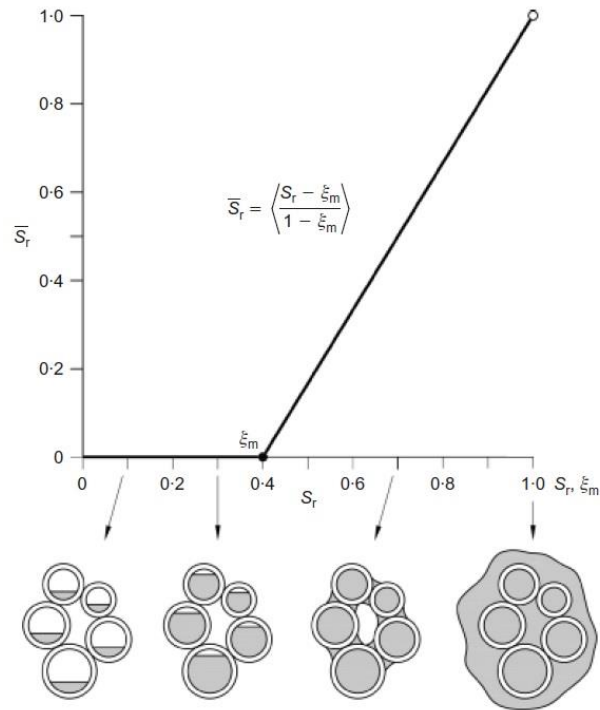


Figura 10. Definición del grado de saturación efectivo (Alonso, et al., 2013)

El grado de saturación efectivo está mostrado en la ecuación 5 y 6 respectivamente

$$\bar{S}_r = \frac{S_r - \xi_m}{1 - \xi_m} \quad (5)$$

Para $S_r > \xi_m$

$$\bar{S}_r = 0 \quad (6)$$

Para $S_r \leq \xi_m$

La ecuación 5 del grado de saturación efectivo fue introducida por (Romero & Vaunat, 2000) y (Tarantino & Tombolato, 2005).

Se ha propuesto que el comportamiento de los suelos no saturados sea definido en términos de dos campos independientes de tensión como se puede ver en la ecuación 7 y 8, dónde se muestra la tensión constitutiva y la succión efectiva respectivamente

$$\bar{\sigma} = \sigma - p_g + \bar{S}_r s \quad (7)$$

$$\bar{s} = \bar{S}_r s \quad (8)$$

Donde la succión efectiva y la tensión constitutiva han sido dependientes del índice de poros, índice de poros de la microestructura y el grado de saturación por medio del grado de saturación efectivo. En la ecuación 7, σ es la tensión total y p_g es la presión de gas.

Existen aspectos parciales (rigidez a torsión elástica, envolvente de falla drenada) del comportamiento de los suelos no saturados donde se muestra que es adecuadamente bien modelados los resultados en términos de la ecuación 7 (Alonso, et al., 2010)

La ecuación 5 fue suavizada en (Alonso, et al., 2010) por medio de una ley potencial ($\bar{S}_r = (S_r)^\alpha$; $\alpha > 1$), la cual provee algunas ventajas en el cálculo. Sin embargo, la función potencial pierde referencia directa con la variable de estado de microestructura ξ_m , la cual es una variable capaz de ser medida experimentalmente en la prueba MIP.

Siguiendo el procedimiento que puso en marcha (Gesto, et al., 2011), una suavización alternativa para \bar{S}_r rápida es $S_r = \xi_m$ que mantiene ξ_m como una variable de estado del material y que puede ser lograda por la ecuación 9

$$\bar{S}_r = \frac{S_r - \xi_m}{1 - \xi_m} + \frac{1}{n} \ln \left[1 + \exp \left(-n_{smooth} \frac{S_r - \xi_m}{1 - \xi_m} \right) \right] \quad (9)$$

El número n_{smooth} define el grado de suavización como se puede ver en la figura 11. Se puede ver que la ecuación 9 proporciona una pequeña contribución de la tensión efectiva para $S_r < \xi_m$ que es más realista que la transición de la figura 10.

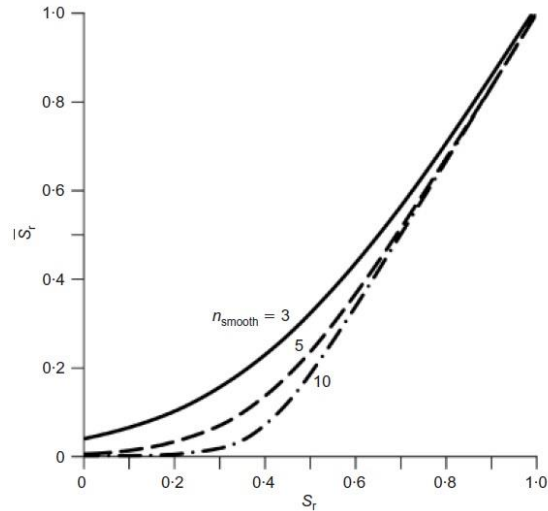


Figura 11. Efecto del parámetro n_{smooth} en el grado de saturación efectiva para $\xi_m = 0.3$ (Alonso, et al., 2013)

Para finalizar, Seed y Chan (1959) destacaron que la estructura del suelo está muy controlada por las deformaciones de corte producidas durante el proceso de compactación. Así, que la compactación estática, que induce poca deformación de corte, conduciría a una estructura floculada, incluso en el lado húmedo, a diferencia de la compactación por golpeo o amasado. (Alonso, 2004)

3.3. Trabajos realizados previamente en la UPC

Es de especial interés para el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya el estudio de los parámetros dinámicos del suelo, ya que lleva mucho tiempo estudiando este comportamiento, que es el de carga cíclica de los suelos, puesto que para obras de infraestructura es muy importante conocerlos y saber cómo se comportan. Es por esto, que he decidido mostrar de manera concisa los estudios previos a este trabajo final de master.

He decidido hacer una clasificación de aquellas tesis que hablan sobre la microestructura del suelo y aquellas que no, para poder ordenarlas de alguna manera y que sea más sencillo mostrar lo que se ha logrado en cada trabajo.

En “Análisis microestructural de la rigidez a pequeñas deformaciones de la bentonita FEBEX en condiciones no saturadas” escrita por Gabriel del Valle Matos Montelli (2013), habla sobre la microestructura y su estudio mediante ensayos de porosimetría de mercurio que, en su caso, y como es de esperarse, mostró una estructura doble, en todas sus muestras compactadas con diferentes densidades secas y grados de saturación. En dicho estudio encontró que la microporosidad está dominada por un diámetro de poro de 10 *nm*, mientras que el diámetro de poro principal que se encuentra en la macroestructura del suelo se encuentra entre 10 *μm* y 25 *μm* en función de la densidad de compactación final.

Así mismo, el módulo de corte a pequeñas deformaciones fue determinado usando el aparato de columna resonante, el cual mostró claramente que el módulo de corte disminuía a medida que el grado de saturación aumentaba. Esta tendencia se observó muy bien para muestras con densidades secas medias y bajas, sin embargo, aquellas con densidades secas altas no parecieron exhibir adecuadamente dicha tendencia.

En otra tesis cuyo título es “Efecto de la microestructura en la permeabilidad, la compresibilidad ante carga y el módulo de corte de un limo arcilloso compactado” escrita por Elías Abdul Ismael Baptista (2013), habla sobre el efecto de la microestructura, específicamente, de la arcilla limosa del llano de la ciudad de Barcelona, sobre algunas propiedades como la permeabilidad saturada, la permeabilidad al aire, la compresibilidad saturada, la tensión de fluencia saturada y el módulo de corte a pequeñas deformaciones. En sus páginas, trata de proporcionar un enfoque adicional de la compactación de los suelos que enriquezca las bases clásicas y ampliamente aceptadas mediante las nuevas evidencias experimentales. Con dichas evidencias, se intentó ofrecer nuevos datos para mejorar las predicciones y los modelos del comportamiento de los suelos compactados.

Se estudió que, para la misma densidad seca, se consiguieron diferentes microestructuras haciendo cambios en la humedad de compactación, las cuales se midieron mediante la técnica de Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP). Sus resultados indicaron que la microestructura tiene un efecto significativo en las propiedades mencionadas, y que la microestructura generada por la compactación en la rama seca se mantiene incluso después de la saturación total.

Pasando a aquellos trabajos que no estudian la microestructura del suelo, comienzo con el titulado “Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de columna resonante” escrito por Josep Suriol Castellví (1993), donde se concluye que el equipo de columna resonante cubre un amplio intervalo de la curva módulo-deformación, el cual permite ensayar suelos con valores del módulo comprendidos entre 10 y 300 *MPa* aproximadamente. Así mismo, enfatiza que la utilización del modelo no-lineal en el cálculo de deformaciones, hace indispensable el conocimiento de la curva módulo-deformación y que es precisamente en el rango que cubre el aparato de columna resonante, donde se produce la mayor variación de la curva módulo-deformación. Para finalizar, resalta que el triaxial convencional solo obtiene medidas fiables de deformación mayores a 10^{-1} %.

En la tesis “Estudio de la deformación angular y volumétrica, así como del módulo de corte de un suelo mediante el equipo de columna resonante” escrita por Jhonny Villavicencio (2008), hace una comparación con muestras obtenidas de un terraplén experimental en Rouen, Francia y otras de carácter remoldeado. Las muestras tenían características distintas, puesto que las remoldeadas eran fabricadas con sus parámetros y las inalteradas procedían de unos sondeos del terraplén, después de haber sido inundado.

En este trabajo se instaló un transductor diferencial de presión (DPT), en el aparato de columna resonante, el cual media el diferencial de presión entre las dos columnas de agua, una que permanecía constante, y otra, que variaba en función de la deformación axial y radial de la muestra cuando era sometida a tensión de confinamiento. Con ello, se logró medir el cambio de volumen en la muestra. Se analizó también la variación de diferentes parámetros como la humedad, peso específico, grado de saturación y módulo de corte *G*, a medida que se iba incrementando la tensión de confinamiento. Se hizo una comparación entre las muestras remoldeadas y las inalteradas, misma que arrojó un resultado favorable para las muestras inalteradas, ya que presentaron mayor rigidez debido a que el peso específico seco era mayor, y de grado de saturación menor, puesto que las remoldeadas presentaron grados de saturación cercanos al 100%, y todo esto en términos de la misma humedad.

En otra tesis titulada “Obtención de los parámetros dinámicos de la arcilla del llano de Barcelona en probetas compactadas saturadas. Equipo de columna resonante” escrita por José Ernesto Hernández Arciniega (2014), se muestra un análisis del suelo del llano de Barcelona

en probetas saturadas, donde se utilizó el método estático de compactación para su manufactura. En dicha tesis se usaron densidades secas de 1.75, 1.80 y 1.85 Mg/m³, y se ensayaron en el equipo de columna resonante para obtener los parámetros dinámicos. En ella, se reafirma que la rigidez del suelo se incrementa a medida que aumenta la densidad seca del suelo, sin embargo, la capacidad del suelo para disipar energía disminuye a medida que el suelo presenta una estructura más compacta.

Por otro lado, en la tesis titulada “Caracterización del comportamiento en pequeñas deformaciones en diferentes suelos de Barcelona” escrita por Marina Botelho Pinheiro (2013), se presenta una investigación desarrollada para la caracterización de la rigidez de un suelo típico de la ciudad de Barcelona y la determinación de los parámetros para los modelos constitutivos Hardening Soil y Hardening Soil Small. En esta tesis, se incluyó el análisis de algunas correlaciones, ensayos básicos de caracterización y ensayos de columna resonante sobre muestras de suelo inalteradas.

Mediante el uso de dicho software, se pudo reproducir de mejor manera el comportamiento de los suelos que se observó en los ensayos, y se analizaron los resultados concluyendo que, para el conjunto de parámetros considerados, los resultados computacionales muestran una solución razonable y satisfactoria. Se pudo observar que, la aproximación al comportamiento de dicho suelo, fue mejor usando Hardening Soil Small, cuyos resultados dan un mejor ajuste a la relación hiperbólica creciente, misma que es típica del tipo de suelo que se ensayó.

Para finalizar, en el trabajo más parecido a este trabajo final de master, se encuentra la tesis titulada “Efecto del cambio de grado de saturación en el módulo de corte y factor de amortiguamiento en suelos compactados parcialmente saturados mediante el equipo de columna resonante” escrita por Ramonita Cabrera Bencosme (2015), donde explicó el comportamiento dinámico del suelo en función del cambio del grado de saturación ante una carga cíclica. Para lograr su objetivo, ella llevó a cabo una campaña de ensayos con probetas cuyos grados de saturación y densidad seca eran impuestos. Los resultados obtenidos demostraron que, la rigidez del suelo disminuye a medida que aumenta el grado de saturación, mientras que el factor de amortiguamiento aumenta a medida que aumenta el grado de saturación, también se confirmó que, la rigidez del suelo aumenta a medida que aumenta la densidad y la tensión de confinamiento, y que, por lo contrario, el factor de

amortiguamiento disminuye, a medida que aumenta la densidad y la tensión de confinamiento.

4. Material utilizado

En este apartado se describirá el material utilizado en el laboratorio para obtener los parámetros dinámicos del suelo en el equipo de columna resonante.

El material que se escogió para este trabajo final de master, es el material almacenado en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Politécnica de Catalunya, que está formado por una arcilla limosa de baja plasticidad del llano de Barcelona. Dicho material ha sido objeto de estudio por mucho tiempo en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental (Gens, et al., 1995) (Suriol, et al., 1998) (Suriol & Lloret, 2007).

Este material está constituido por 30% de arena, 46% de limo y 24% de arcilla. Su límite líquido es de 31% y su límite plástico es de 19%. La densidad de las partículas sólidas es de 2.69 Mg/m^3 (Suriol, et al., 2014). El porcentaje de partículas menores a $2 \mu\text{m}$ es de 15% (Romero, 2013)

En la figura 12 se puede observar el material descrito con anterioridad, tamizado por la malla número 10, que es la abertura de 2 mm , para remover aquellas partículas mayores a dicho tamaño.



Figura 12. Material de estudio del llano de Barcelona

Se hizo una granulometría del material natural (sin alterar el tamaño de sus partículas con el mazo de goma) para poder clasificarlo según la carta de Unified Soil Classification System (SUCS), y se pudo determinar que, efectivamente, la parte fina de éste material corresponde a una arcilla limosa.

En la figura 13 se muestra el material natural como se encuentra almacenado en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Politécnica de Catalunya.



Figura 13. Material natural del llano de Barcelona

En la tabla 3 se puede observar los pesos de cada malla, así como el peso retenido en cada malla, el acumulado y el porcentaje que pasa por cada una de las mallas. También se observa el peso total de la muestra, que en este caso fueron 1,857.88 g con una pérdida en el proceso que se desprecia por no contar con el equipo necesario para vibrar bien el material dentro de las mallas. En dicha tabla se puede ver la fracción gruesa y fina del material en estudio, así como los diámetros de las partículas de interés como son el D60, D30 y D10.

Se calculó el coeficiente de uniformidad C_u con la ecuación 10 y el coeficiente de curvatura C_c con la ecuación 11.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (10)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{10} * D_{60})} \quad (11)$$

Tabla 3. Granulometría del material natural utilizado

Malla	Abertura	Peso de la malla	Peso retenido con malla	Peso retenido	Parcial retenido	Acomulado	Porcentaje que pasa
	mm	g	g	g	%	%	%
3"	76,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
1 1/2 "	38,10	743,50	743,50	0,00	0,00	0,00	100,00
1"	25,40	772,15	772,15	0,00	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,10	730,58	730,58	0,00	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,70	739,12	786,81	47,69	2,57	2,57	97,43
3/8"	9,50	490,91	552,44	61,53	3,31	5,88	94,12
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00	5,88	94,12
No.4	4,70	754,88	1060,05	305,17	16,43	22,30	77,70
No. 10	2,00	399,69	841,96	442,27	23,81	46,11	53,89
No. 20	0,84	273,56	623,67	350,11	18,84	64,95	35,05
No. 40	0,42	340,98	575,60	234,62	12,63	77,58	22,42
No. 60	0,25	240,16	382,76	142,60	7,68	85,26	14,74
No. 100	0,14	247,70	363,99	116,29	6,26	91,52	8,48
No. 200	0,07	315,35	374,40	59,05	3,18	94,70	5,30
Peso total de la muestra		1857,88	g				
Grava	22,30	%	D60	2,6	mm	Cu	14,86
Arena	72,39	%	D30	0,65	mm	Cc	0,93
Finos	5,30	%	D10	0,175	mm	SUCS	SP - SC

En la figura 14 se muestra la gráfica de la granulometría, que, basándonos en los cálculos anteriores y siguiendo la carta SUCS, dio un resultado de ser una arena arcillosa mal graduada con pocos finos.

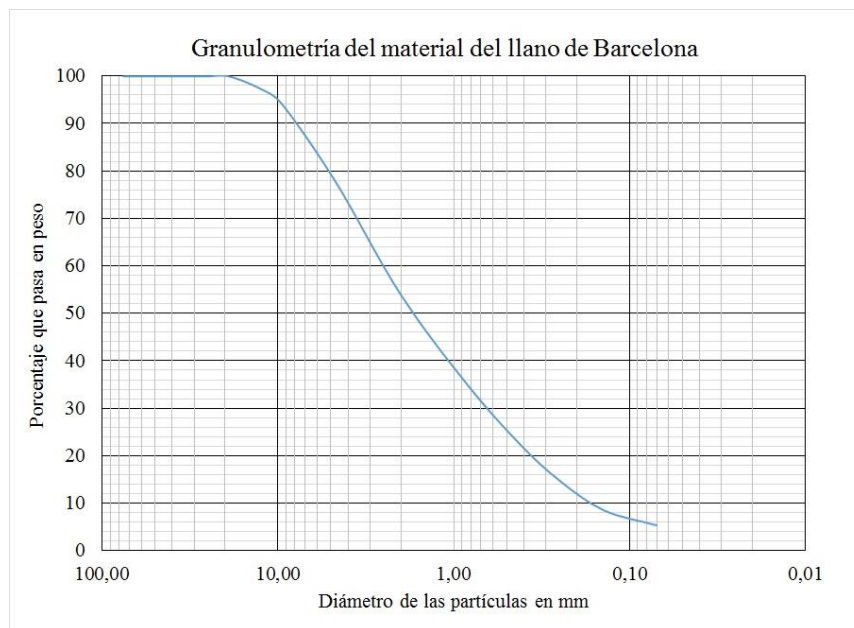


Figura 14. Gráfica granulométrica del material natural

Las probetas obtenidas de este material compactado son de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura. Lo que representa un volumen por probeta de 86,19 cm³. Estas probetas se intentaron hacer a dos densidades secas de 1.65 y 1.75 Mg/m³.

5. Equipo utilizado en laboratorio

En este capítulo se describe el equipo utilizado en el laboratorio para poder obtener los parámetros dinámicos de los especímenes con éxito. Sin embargo, el principal equipo utilizado es la columna resonante, por ello, se explica a detalle sus partes y la forma en la que funciona. Por otro lado, no podemos dejar de mencionar los equipos que se utilizaron en todo el proceso, como son: la báscula, el horno, los tamices y la prensa WF 5,000 kg.

5.1. Columna resonante

El ensayo de columna resonante consiste en someter un espécimen cilíndrico de suelo a un estado de vibración forzada longitudinal o torsional, variando la frecuencia de excitación hasta lograr la resonancia del espécimen. El módulo correspondiente se calcula con los datos de la frecuencia de resonancia f_r , la geometría del espécimen, como se muestra en la figura 15, y las características del equipo (Díaz Rodríguez, 2005).

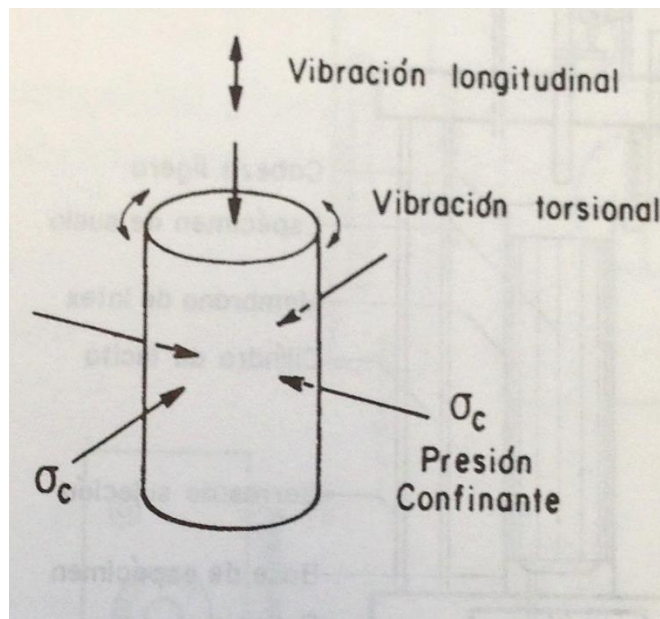


Figura 15. Probeta sólida con vibración torsional (Díaz Rodríguez, 2005)

El equipo utilizado en este trabajo final de master corresponde al desarrollado por Anderson y Stokoe (1978), en el cual la probeta cilíndrica y sólida se somete a una vibración torsional. La probeta se encuentra libre en el extremo superior, que es el extremo que se somete a la oscilación torsional, y fija en el extremo inferior. En la figura 16 se muestra un esquema del sistema mecánico del dispositivo del equipo de columna resonante.

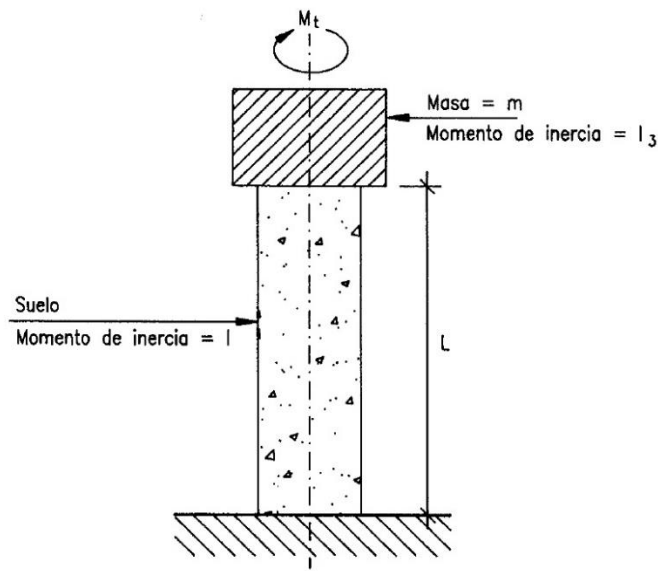


Figura 16. Sistema mecánico del dispositivo (Suriol Castellví, 1993)

Este equipo, es un complemento dentro del laboratorio, en cuanto al alcance de la medida de deformación a corte γ , puesto que, permite determinar el módulo de corte G a pequeñas deformaciones, mismas que otros equipos no alcanzan, como se muestra en la figura 17.

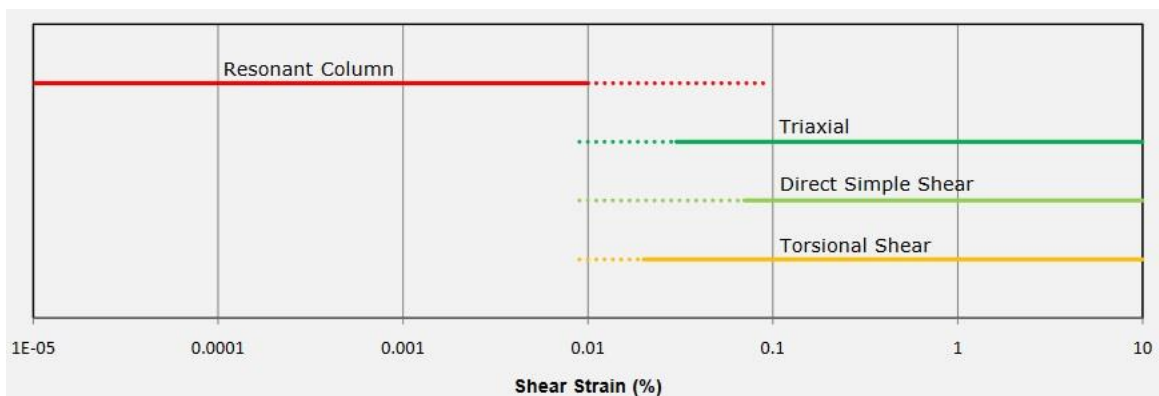


Figura 17. Rangos de deformación a corte en equipos de laboratorio (Dyvik, 2010)

En la figura 18 puede verse un esquema de la disposición del equipo de ensayo, así como los componentes necesarios para su realización. El par torsor M_t mostrado en la figura 16, se aplica por rozamiento a la cara superior de la probeta, y es generado por un sistema motor de tipo eléctrico. Un sistema de bobinas alimentadas por corriente alterna a frecuencia variable transfieren la energía electromagnética a unos imanes permanentes solidarios al cabezal que se apoya sobre la cara superior de la probeta. La geometría de las bobinas hace que el sistema oscile cíclicamente siguiendo la frecuencia de la corriente de alimentación. La impedancia eléctrica del sistema es prácticamente constante en la gama de frecuencias usuales (10 a 100 Hz); con ello se asegura la linealidad entre la corriente aportada y el par torsor generado (Suriol Castellví, 1993)

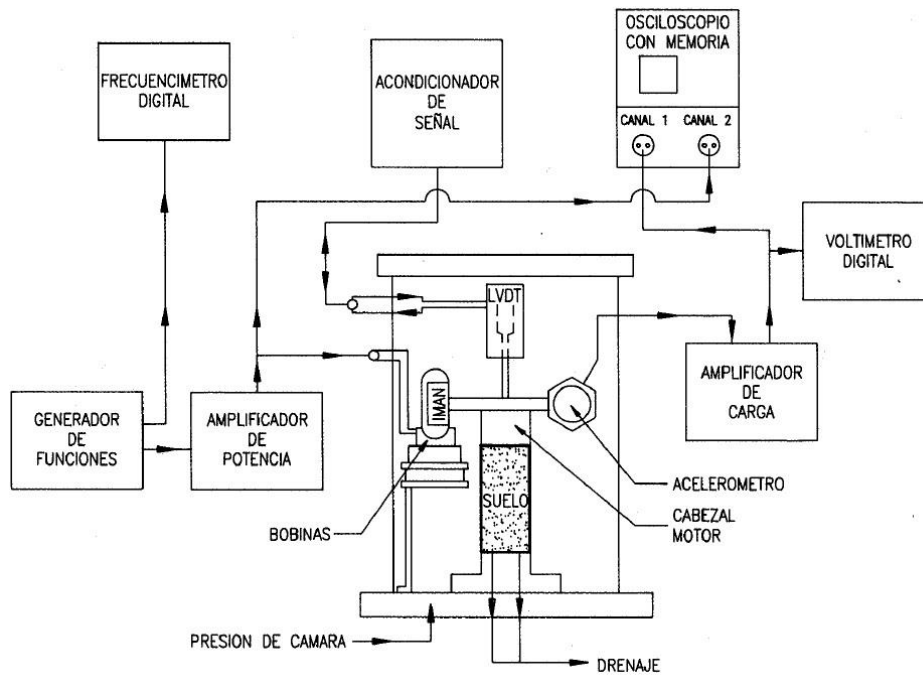


Figura 18. Esquema de la disposición de la instrumentación para el ensayo (Suriol Castellví, 1993)

Para fines prácticos, se mencionarán las partes del equipo de columna resonante dividiéndolas en dos grupos: Partes internas de la cámara y partes externas.

En las partes externas, figura 18, se encuentran, el acondicionador de señal, el osciloscopio con memoria, el voltímetro digital, el amplificador de carga, el generador de pulsos, el generador de funciones y el amplificador de potencia.

Así mismo, y como se muestra más a detalle en la figura 19, se encuentran las partes internas de la cámara, las cuales son: las bobinas, los imanes, el acelerómetro, el cabezal motor, la cámara de presión y el sistema de drenaje por la parte inferior.

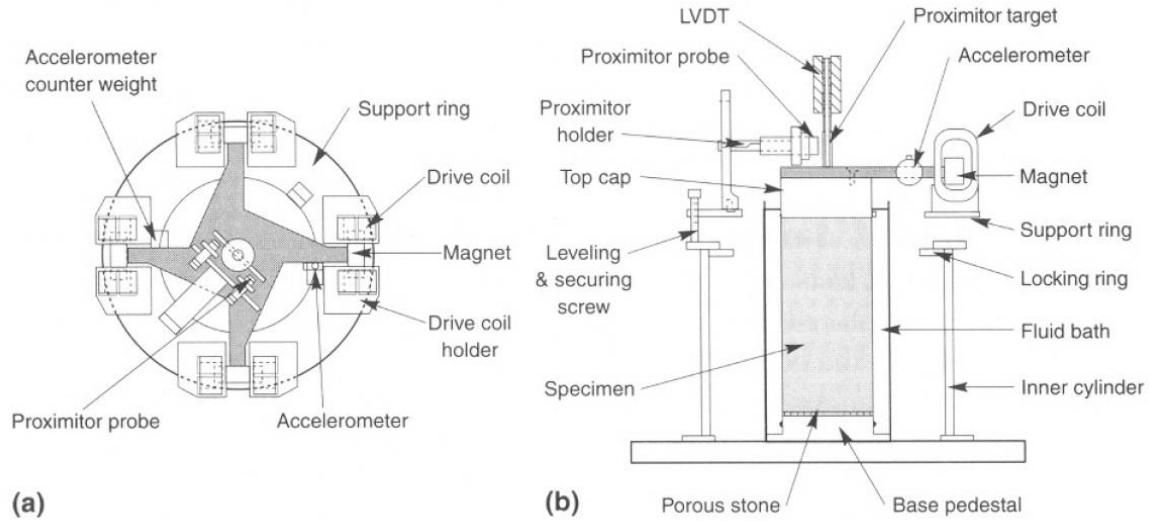


Figura 19. Dispositivo tipo de un ensayo de columna de resonancia: (a) Vista superior del sistema de carga (b) Vista lateral del sistema de carga (Suriol Castellví, 1993)

5.2. Principios de su funcionamiento

Para comenzar, elegí explicar cómo funciona el equipo de columna resonante en su parte experimental, mediante la obtención de la deformación de corte promedio $\bar{\gamma}$, como se puede ver en la ecuación 12, que se obtiene mediante el ángulo de rotación promedio del espécimen, como se puede ver en la figura 20.

$$\bar{\gamma} = \frac{2}{3} \gamma_{max} = \frac{2R\ddot{a}}{3R_a L (2\pi f)^2} = \frac{Rk_{acc}}{12\pi^2 R_a L} \frac{V_{pp}}{f^2} \quad (12)$$

Dónde,

γ_{max} = Deformación de corte máxima

R = Radio de la probeta, 0.019 m

\ddot{a} = Aceleración lineal medida en el acelerómetro

R_a = Radio al acelerómetro, 0.084 m

L = Altura de la probeta, 0.076 m

f = Frecuencia del movimiento en Hz

k_{acc} = Constante de calibración de la salida del acelerómetro, $6.5 \frac{m}{s^2V}$

V_{pp} = Valor pico-pico de la salida del acelerómetro en Volts

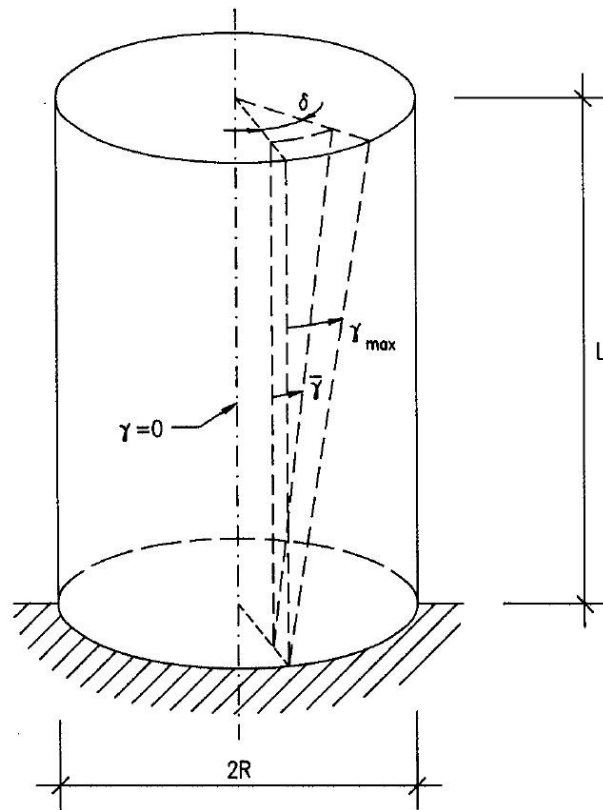


Figura 20. Deformación angular media (CIMNE-UPC-GEOLAB, 2014)

Cuando se varía la señal de frecuencia de entrada, la amplitud de vibración cambia también hasta que se alcanza la resonancia. Este primer modo de resonancia se define como la frecuencia más baja en la que se obtiene el máximo movimiento torsional de la parte superior del espécimen, el cual está en fase con el movimiento de excitación. Para obtener el módulo de corte elástico G se mide la velocidad de las ondas de corte v_s que, para un medio elástico, homogéneo e isótropo, la ecuación 13 se define como se muestra.

$$G = \rho v_s^2 \quad (13)$$

Dónde,

ρ = Densidad del suelo

v_s = Velocidad de las ondas de corte

La velocidad de ondas de corte pueden ser medidas teniendo en cuenta las propiedades geométricas de la columna resonante y la frecuencia de resonancia como se puede ver en la ecuación 14.

$$v_s = \frac{2\pi f_r L}{\alpha} ; \alpha \tan \alpha = \frac{J_s}{J_m} \quad (14)$$

Dónde,

f_r = Frecuencia de resonancia en *Hz*

L = Altura de la probeta, 0.076 *m*

Para $J_m \gg J_s$, $\alpha^2 = \frac{J_s}{J_m}$

J_s = Momento de inercia polar del espécimen de suelo en *kg m²*

J_m = Momento de inercial polar del sistema oscilatorio, 0.0026 *kg m²*

El momento de inercia polar del espécimen de suelo fue obtenido de la norma ASTM D4015 y se indica en la ecuación 15.

$$J_s = \frac{Md^2}{8} \quad (15)$$

Dónde,

M = Masa total del espécimen en *kg*

d = Diámetro del espécimen en *m*

La ecuación 16 muestra la sustitución del valor de la velocidad de las ondas de corte, ecuación 14, en la ecuación del módulo de corte elástico, en donde se define una constante K (ecuación 17) cuyas unidades son de *Pa s²*

$$G = \frac{4\pi^2 \rho L^2}{\alpha^2} f_r^2 = K f_r^2 \quad (16)$$

$$K = \frac{8\pi J_m}{R^4} L \quad (17)$$

Para finalizar, el amortiguamiento D , como se ve en la ecuación 18, se obtiene del decrecimiento logarítmico μ de la amplitud que está bajo oscilación libre en la columna de suelo.

$$D = \frac{\mu}{2\pi} ; \mu = \frac{\ln(A_i/A_{i+n})}{n} \quad (18)$$

Dónde,

μ = Decrecimiento logarítmico

A_i = Amplitud del ciclo "i"

A_{i+n} = Amplitud del ciclo "i + n"

n = Número de ciclos

Por otro lado, la deformación de corte γ necesaria para alcanzar cierto porcentaje del módulo de corte inicial G_0 , depende del estado de la muestra (densidad seca y contenido de agua). Para analizar este resultado que se observa en la figura 21, fue utilizado en (CIMNE-UPC-GEOLAB, 2014) el modelo "Hardening Soil con pequeñas deformaciones a torsión" usando el software PLAXIS (2014) y su resultado fue la ecuación 19.

$$G(\gamma) = \frac{G_0}{1 + 0.385 \frac{\gamma}{\gamma_{0.7}}} ; \frac{G(\gamma_{0.7})}{G_0} = 0.722 \quad (19)$$

Dónde $\gamma_{0.7}$ corresponde a cierta deformación de corte a la cual el módulo G es $0.722G_0$

La ecuación 20 es necesaria para calcular el factor de amortiguamiento analítico en la ecuación 21 y es definida como la tensión de corte final τ_f , dividida por el módulo de corte inicial G_0 .

$$\gamma_r = \frac{\gamma_{0.7}}{0.385} \quad (20)$$

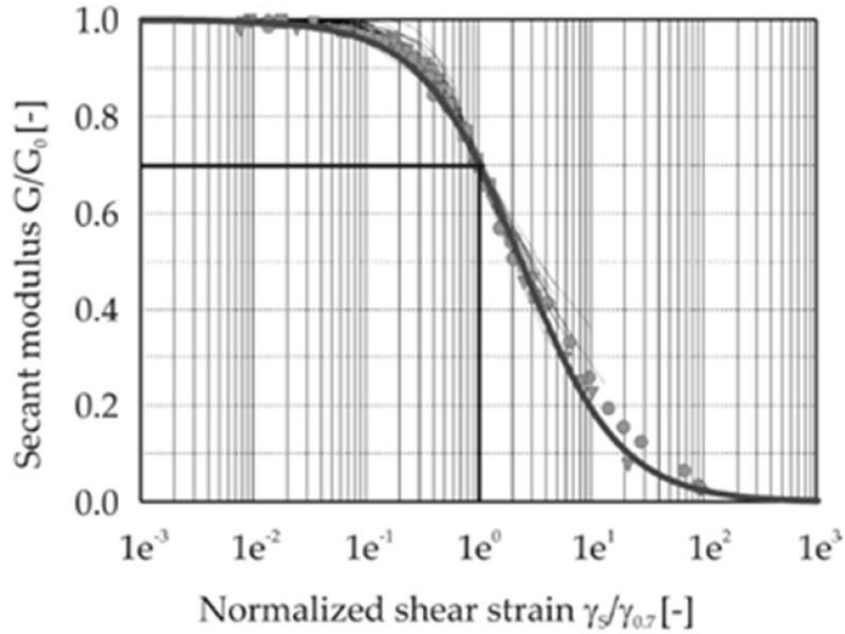


Figura 21. Variación del módulo de corte normalizado con respecto a la deformación de corte normalizada en $\gamma_{0.7}$ (Santos & Correia, 2001)

Una vez encontrando el valor de γ_r , se obtuvo el valor del factor de amortiguamiento para cada deformación de corte con la ecuación 21, minimizando los parámetros de D_0 y D_{max} .

$$D = D_0 + D_{max} \left\{ 2 \left[1 + \frac{1}{\frac{\gamma}{\gamma_r}} \right] \left[1 - \frac{\ln \left(1 + \frac{\gamma}{\gamma_r} \right)}{\frac{\gamma}{\gamma_r}} \right] - 1 \right\} \quad (21)$$

6. Metodología del ensayo

En este capítulo, se intenta llevar de la mano al lector, sobre todo el proceso que se llevó a cabo en el laboratorio, para obtener satisfactoriamente los resultados dinámicos de la columna resonante, iniciando por la preparación del material a ensayar, después explicando paso a paso la compactación de la probeta, más tarde detallando específicamente el proceso para someter la probeta a la carga de confinamiento de 200 kPa, y por último haciendo énfasis en cómo ensayar la probeta en el aparato de columna resonante bajo carga cíclica.

6.1. Preparación del material

Primero se separó 1.5 kg de material seco, para que el material alcanzara para unas 8 probetas, esto consiste en triturar el material con el mazo de goma y después pasarlo por el tamiz número 10, que es la abertura de 2 mm, para remover todas aquellas partículas mayores a éste tamaño. Esto se puede apreciar en la figura 22 y figura 23.



Figura 22. Trituración del material con el mazo de goma



Figura 23. Tamiz número 10, abertura de 2 mm

Cuando el material seco se terminó, se volvió a utilizar el mismo material triturando las probetas secas de ensayos pasados como se puede apreciar en la figura 24.



Figura 24. Reutilización del material seco

Una vez teniendo 1.5 kg de material seco como se muestra en la figura 25, se procedió a separarlo según su densidad seca y el volumen de las probetas, más un 15% de abundamiento para obtener la humedad de cada espécimen. El material seco separado para cada probeta se muestra en la figura 26.



Figura 25. Material tamizado para hacer las probetas



Figura 26. Material seco de una probeta con densidad de 1.65 Mg/m^3 , más 15% de abundamiento

Más tarde, se le agregó peso de agua destilada según la humedad de cada probeta y se fue incorporando poco a poco hasta obtener un material con humedad homogénea. Esto se muestra en las figuras 27, 28 y 29.



Figura 27. Material seco con agua destilada



Figura 28. Incorporación del agua con el material seco



Figura 29. Material con humedad homogénea

Para finalizar, el material con humedad homogénea se envolvió en papel film para evitar que la humedad se perdiera y se dejó reposar una noche para que la humedad se terminara de distribuir adecuadamente dentro de toda la estructura del material, esto se puede apreciar en la figura 30.

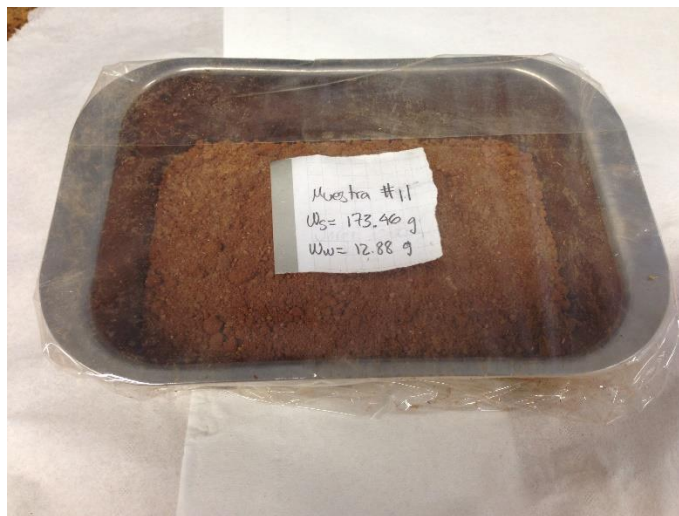


Figura 30. Material con humedad homogénea empaquetado para reposar una noche

En la figura 31 se puede observar la diferencia entre la humedad deseada, de una misma probeta, (w proyecto) y las humedades obtenidas realmente, tanto para el proceso de compactación (w compactación), como para el proceso de ensayo de la columna resonante (w CR).

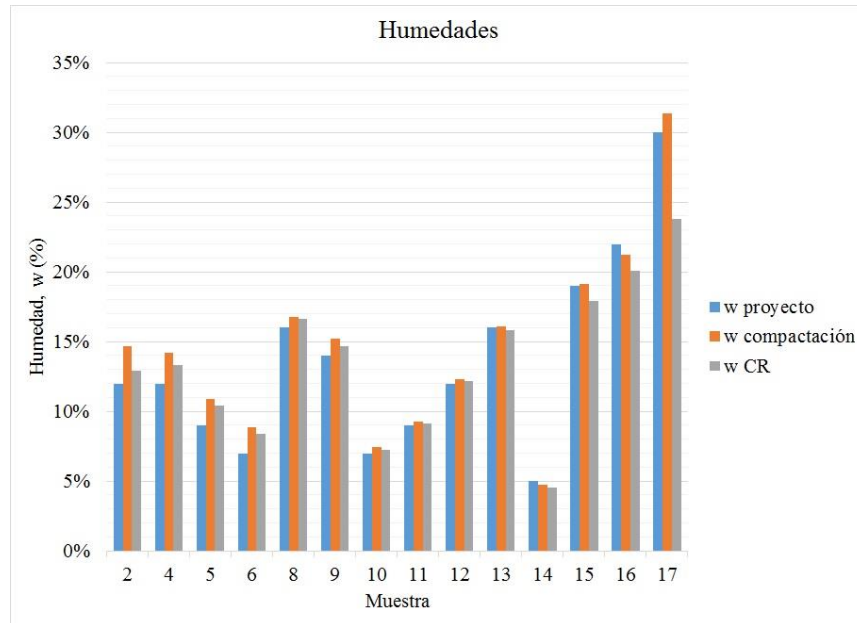


Figura 31. Control de humedades de cada probeta

6.2. Compactación de la probeta

Una vez teniendo el material listo para su compactación, se continuó con los trabajos necesarios para poder compactar las muestras. Primero que nada, se desarmó el molde para aceitarlo bien, pues muchas veces si no se encuentra bien aceitado la muestra se puede pegar a las paredes internas del molde y con ello romperse. En la figura 32 se muestran todas las partes utilizadas.



Figura 32. Piezas utilizadas para la compactación de las probetas

Aceitado el molde, se vuelve a armar, sin apretar mucho los tornillos para que el embolo superior pueda bajar con facilidad, y en este caso se colocó dos piezas metálicas en la parte inferior del molde, para lograr una compactación por ambos lados de la muestra, las cuales se aprecian muy bien en la figura 33.



Figura 33. Molde engrasado, listo para recibir material

Una vez armado el molde, se introduce el material húmedo, pero sólo el peso necesario para obtener una densidad seca de 1.65 Mg/m^3 ó 1.75 Mg/m^3 , ya que anteriormente se había preparado un 15% más de material para medir la humedad de cada muestra. Es decir, no se introduce todo el material que se había preparado. Esto se puede ver en la figura 34.



Figura 34. Introducción del material húmedo en el molde de compactación

El 15% de material húmedo restante, se pesa en una tara y se mete al horno por 24 horas para conocer la humedad de cada probeta a la hora de su compactación, no sin antes colocar una etiqueta para llevar un control de las muestras, esto se puede apreciar en la figura 35.



Figura 35. Material húmedo listo para ser metido en el horno

Con el material listo en el molde y el 15% del material húmedo en el horno, se le coloca el embolo superior al molde y se lleva a la prensa WF 5,000 kg. Allí se coloca el molde negro entre la célula de carga (parte superior) y el plato inferior móvil para compactar la muestra como se muestra en la figura 36.

Antes de comenzar la compactación, se ajusta el molde negro con el suelo húmedo en su interior, de tal forma que la célula de carga este tocando el embolo superior del molde para garantizar que haya contacto. Más tarde, se inicia el programa en el ordenador para obtener los datos de la compactación.

Dentro del software de compactación, se eligió que tomara lecturas cada segundo y se introdujo los valores producto de su calibración tanto de la pendiente de la recta como el término independiente. Estos valores se pueden observar en la ecuación de la figura 37.



Figura 36. Prensa WF 5,000 kg

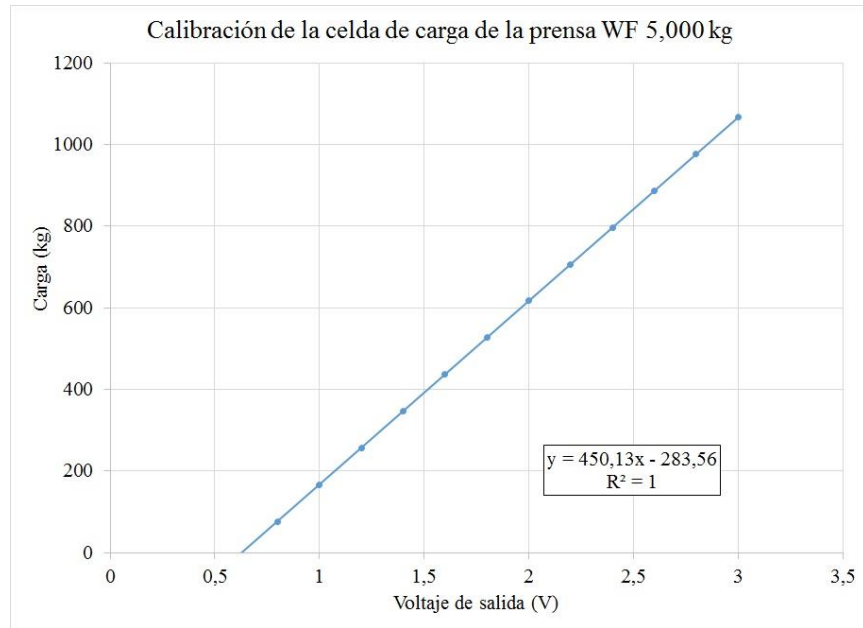


Figura 37. Calibración de la celda de carga de la prensa WF 5,000 kg

En la figura 38 se muestra la compactación en marcha; puede apreciarse que cuando el embolo superior ha finalizado su carrera, es momento de remover las piezas metálicas de la parte inferior, para que la compactación sea por abajo. En esta etapa, se utilizaron distintas velocidades de compactación, mismas que se muestran en la tabla 4.



Figura 38. Compactación en marcha

Tabla 4. Velocidad de desplazamiento de la prensa WF 5,000 kg

Muestra	Densidad seca real	Humedad real	Lectura del visor	Velocidad de desplazamiento	Muestra	Densidad seca real	Humedad real	Lectura del visor	Velocidad de desplazamiento
	$\frac{Mg}{m^3}$	%	mV x 10	$\frac{mm}{min}$		$\frac{Mg}{m^3}$	%	mV x 10	$\frac{mm}{min}$
2	1,62	12,92%	NA	NA	11	1,73	9,15%	520	1,5
4	1,62	13,34%	700	2	12	1,73	12,18%	520	1,5
5	1,62	10,44%	700	2	13	1,73	15,83%	520	1,5
6	1,62	8,35%	700	2	14	1,63	4,53%	700	2
8	1,62	16,61%	700	2	15	1,63	17,88%	520	1,5
9	1,63	14,65%	700	2	16r	1,63	20,06%	340	1
10	1,73	7,26%	520	1,5	17r	1,63	23,78%	180	0,5

Las velocidades de desplazamiento se eligieron según la densidad seca y la humedad de cada probeta, siendo las más húmedas, las que más lento se compactaban, y entre más densas también. En la figura 39 se muestra la variación de la velocidad en $\frac{mm}{min}$, en función de los $mV \times 10$ que aparecen en el visor de la prensa WF 5,000 kg.

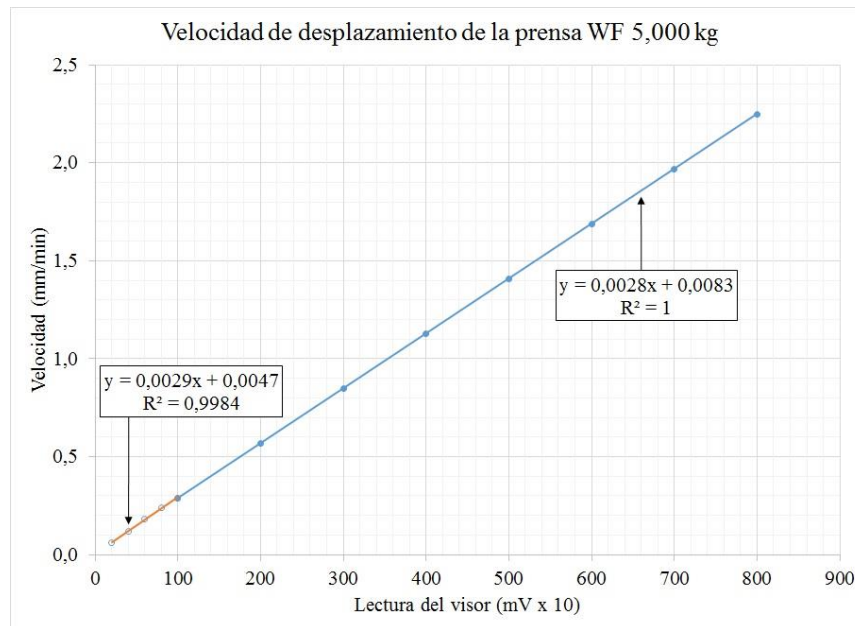


Figura 39. Velocidades de desplazamiento de la prensa WF 5,000 kg

Al finalizar la compactación, se deja el molde con el suelo compactado 10 minutos bajo la carga máxima. Mientras esto ocurre se obtienen los datos de la compactación del ordenador. Una vez transcurrido ese tiempo, se desmonta el molde de la prensa para sacar la muestra con un embolo engrasado, como se muestra en la figura 40.



Figura 40. Probeta compactada lista para ensayo

Después de obtener la probeta del molde, se envuelve en papel film para mantener su humedad y se etiqueta, puesto que transcurrirá una semana para que sea ensayada en el aparato de columna resonante.

Para finalizar, se muestra la evolución de la tensión de compactación con respecto al tiempo, producto de los datos obtenidos de la compactación, como se puede ver en la figura 41, y de dicha gráfica se obtiene el módulo edométrico E_m , usando en el cálculo, la derivada máxima de la tensión de compactación en función del tiempo, la velocidad de compactación y la altura de la probeta.

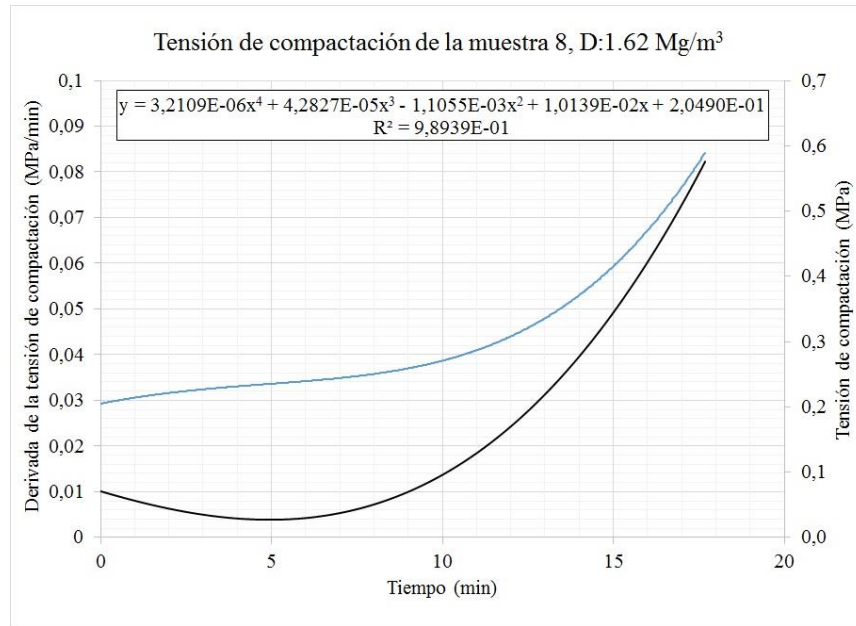


Figura 41. Tensión de compactación estática de la muestra 8 y derivada de la tensión con respecto al tiempo

En el último caso de compactación, se preparó un material con 30% de humedad (cerca del límite líquido) para garantizar que la muestra obtenida después de la compactación estuviera 100% saturada. En la figura 42, se puede ver la compactación estática en marcha, y particularmente se observa cómo expulsó agua durante la compactación para terminar con una humedad de 25% aproximadamente, que es la humedad de saturación del material en estudio.



Figura 42. Muestra 17r en proceso de compactación

6.3. Aplicación de la carga de 200 kPa en el equipo de columna resonante

Después de una semana de estar guardadas aquellas muestras por debajo del 80% de saturación, finalmente se sacan de su papel film para ser ensayadas en el aparato de columna resonante. Lo primero que se hace, es pesar la probeta para poder calcular la humedad antes del ensayo de columna resonante, y así poder comparar la humedad antes y después del ensayo. Después de ser pesada, la muestra pasa a ser colocada en su sitio como se muestra en la figura 43 y se le coloca el cabezal, como se muestra en la figura 44, que será el responsable de transmitir la carga cíclica a la probeta por fricción.

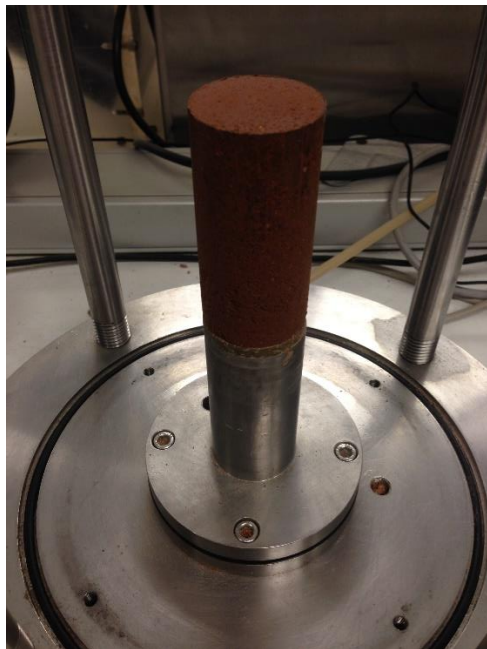


Figura 43. Probeta colocada en su lugar dentro del equipo de columna resonante

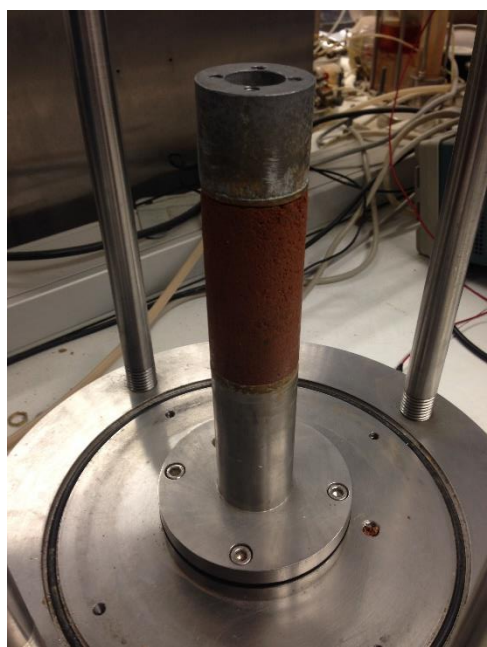


Figura 44. Cabezal colocado en su lugar listo para el ensayo

Para poder aplicar la presión de confinamiento y garantizar que la probeta esté aislada del medio ambiente y que no pierda su humedad, a continuación, se coloca una membrana elástica utilizando un tubo que tiene una perforación a la cual se le ha añadido una manguera para poder hacer succión como se muestra en la figura 45.

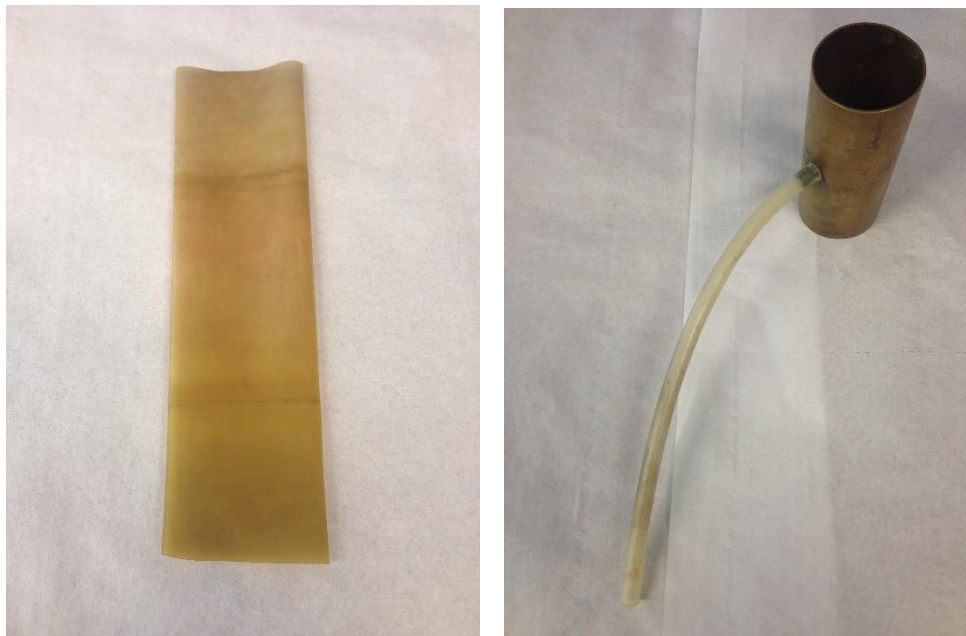


Figura 45. Membrana elástica y tubo para colocarla en la probeta

La membrana elástica es introducida en el tubo, y se le da vuelta hacia afuera al sobrante para que la membrana quede sujeta al tubo, esto es con el fin de que, a la hora de hacer succión por la manguera, la membrana quede perfectamente expandida dentro del tubo y tocando todo el contorno interno, para así poderla colocar en la probeta, esto se muestra en la figura 46.



Figura 46. Membrana elástica colocada dentro del tubo

Más tarde, se introduce el tubo con la membrana, haciendo succión por la manguera, en la probeta y se deja de hacer succión para que la membrana quede perfectamente sujeta ahora a la probeta. Los sobrantes de la membrana de cada lado se colocan muy bien por arriba y por debajo de la probeta como se muestra en la figura 47.



Figura 47. Colocación de la membrana elástica sobre la probeta

Después se colocan las ligas en ambos extremos de la probeta, tanto en la base, donde se apoya la probeta, como en el cabezal, y se da vuelta al sobrante de la membrana elástica sobre la liga como se muestra en la figura 48.

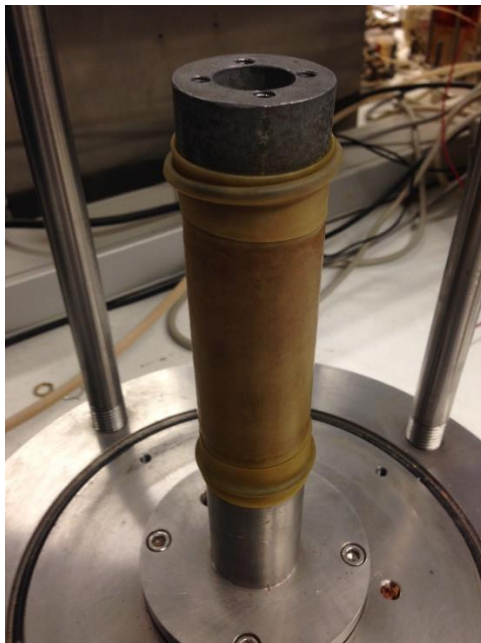


Figura 48. Probeta con membrana y ligas, lista para ser ensayada en la columna resonante

Es en este momento cuando la probeta se encuentra lista y en su sitio para ser ensayada, lo único que falta es armar cada parte del aparato de columna resonante. Lo que sigue es colocar la base metálica que es el soporte que sostendrá al sistema de carga que va sujeto al cabezal, el cual transmite el movimiento cíclico a la probeta. Esto se puede ver en la figura 49.

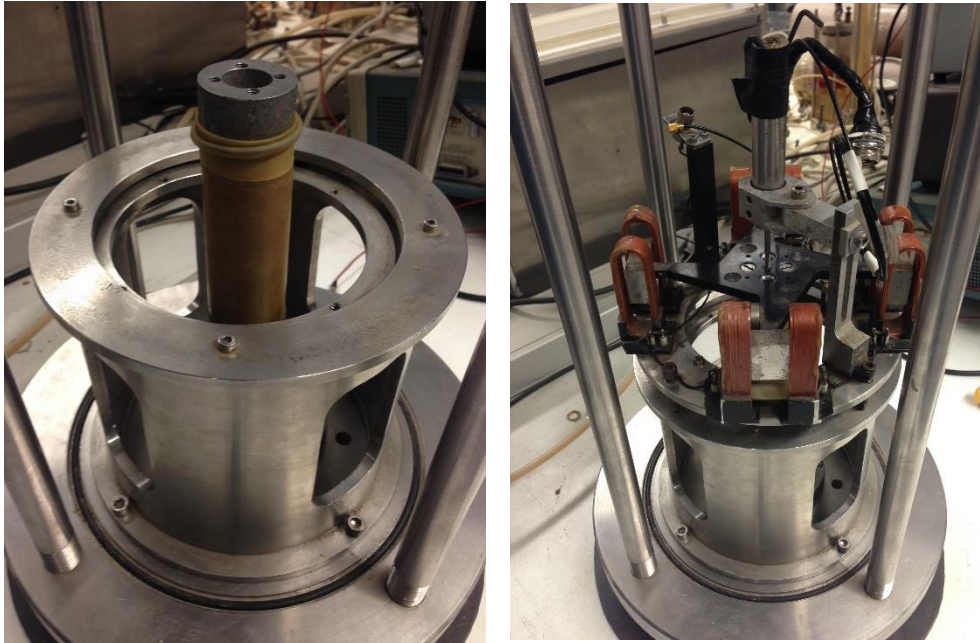


Figura 49. Base metálica y sistema de carga

Una vez habiendo colocado los tornillos suficientemente apretados para que la base metálica no se mueva, se ponen los tornillos que unen al sistema de carga con el cabezal, que serán el conjunto encargado de aportar la carga cíclica a la probeta, finalmente, se aprietan los tornillos que unen al sistema de carga con la base metálica, no sin antes verificar que los imanes no toquen las bobinas, es decir, que el sistema de carga esté bien alineado en su centro para proporcionar el movimiento cíclico libremente.

A continuación, se coloca la cámara metálica por adentro de los soportes verticales, la cual, contiene 3 puertos necesarios para obtener los datos tanto de la columna resonantes como los del LVDT para el asentamiento de la probeta a la hora de recibir la carga de confinamiento. En la figura 50 y 51 se muestra lo descrito. Hay que mencionar que estos puertos estaban averiados debido a la desconexión de varias soldaduras y fue necesario rehacer las soldaduras eléctricas y recubrirlas con resina epoxi para garantizar su durabilidad.



Figura 50. Parte interna de la cámara con 3 puertos. Uno para LVDT y dos para la columna resonante



Figura 51. Cámara colocada en su lugar con cables conectados para obtener lecturas

Antes de continuar con la metodología de esta parte del ensayo, se tuvo que calibrar el LVDT del aparato de columna resonante como se muestra en la figura 52, el cual tiene un error de

14.79 μm , para obtener la ecuación de la recta que nos convierta los kilogramos que despliega el LVDT a milímetros de deformación.

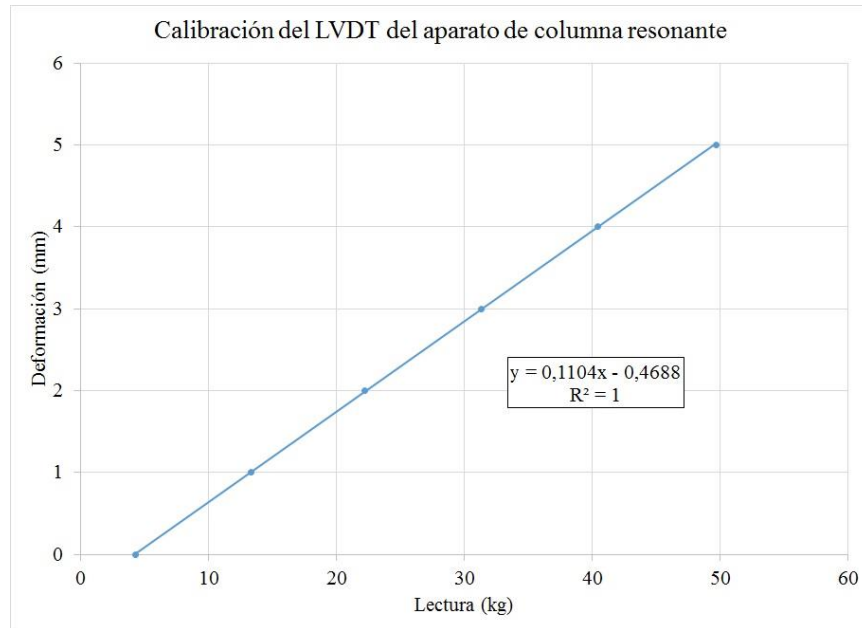


Figura 52. Calibración del LVDT de la columna resonante

Después de colocar la cámara de la columna resonante, se pone la tapa como se muestra en la figura 53, y se cierra herméticamente con las cuatro tuercas y sus rondanas. Es importante apretar bien las tuercas porque son las encargadas de aguantar la presión de confinamiento que habrá dentro de la cámara. Más tarde, se coloca la manguera en la parte superior de la tapa, que llevará el aire de confinamiento a la cámara por medio de la conexión que hay en la tapa, verificando que las llaves tanto de entrada como de salida estén bien cerradas. En este momento, se abre la llave de paso que va del compresor al manómetro y se aplica la carga sin haber abierto aún la llave que va directo a la cámara. Es ahora cuando se pulsa “play” en el programa del ordenador de la columna resonante para recolectar los datos del LVDT y obtener el asentamiento. Es en ese mismo instante que se abre la llave de paso que va directo a la cámara para dejar pasar el aire. En la figura 54 se muestra el manómetro que mide cuánta presión de confinamiento se aplica a las muestras.

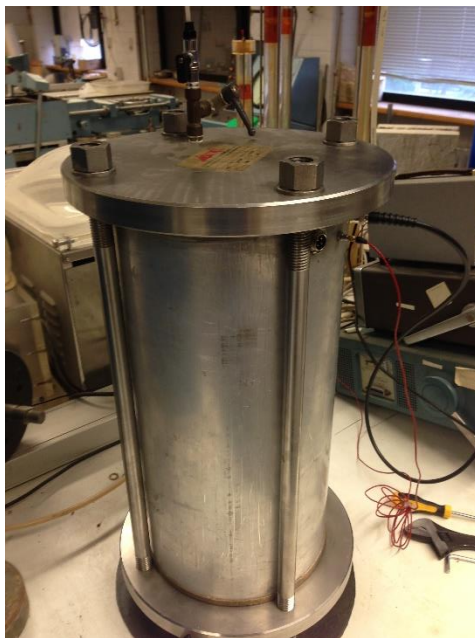


Figura 53. Célula de la columna resonante completa, con la tapa cerrada



Figura 54. Manómetro con la presión de 200 kPa

A partir de este momento, se dejará la probeta asentar aproximadamente 24 horas, para aquellas probetas que no exceden el 80% de grado de saturación, ya que las más saturadas requirieron más tiempo para obtener toda la curva de su consolidación. En la figura 55 se

muestra la curva de asiento de la muestra 13, que tiene una densidad seca real de 1.73 Mg/m^3 , con una humedad del 15.83% y un grado de saturación de 77.17%.

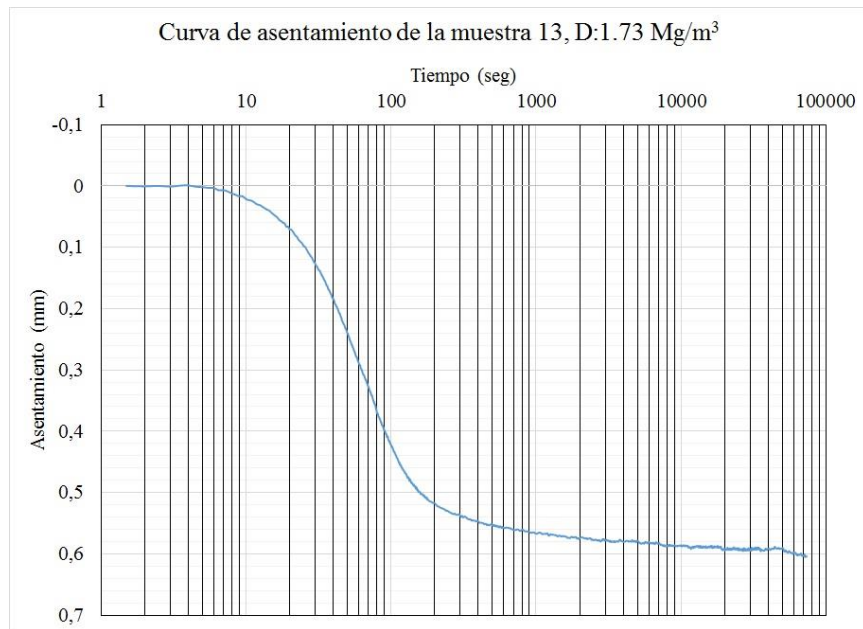


Figura 55. Curva de asiento - tiempo

Después de que la probeta ya no se mueve más, se detiene el programa del ordenador de la columna resonante y se obtienen los datos por medio de una unidad de disco A 3 ½; por otra parte, se desconecta el cable del LVDT ya que agrega ruido al ensayo de columna resonante.

Para finalizar, hubo dos casos en los que se utilizó agua para evitar que las muestras perdieran humedad debido al aire de confinamiento. Esto con el fin de obtener muestras con el 83% y 100% del grado de saturación. La muestra 17r se puede ver en la figura 56, y se puede ver cómo fue colocada el agua en una cámara interna de la cámara metálica exterior.

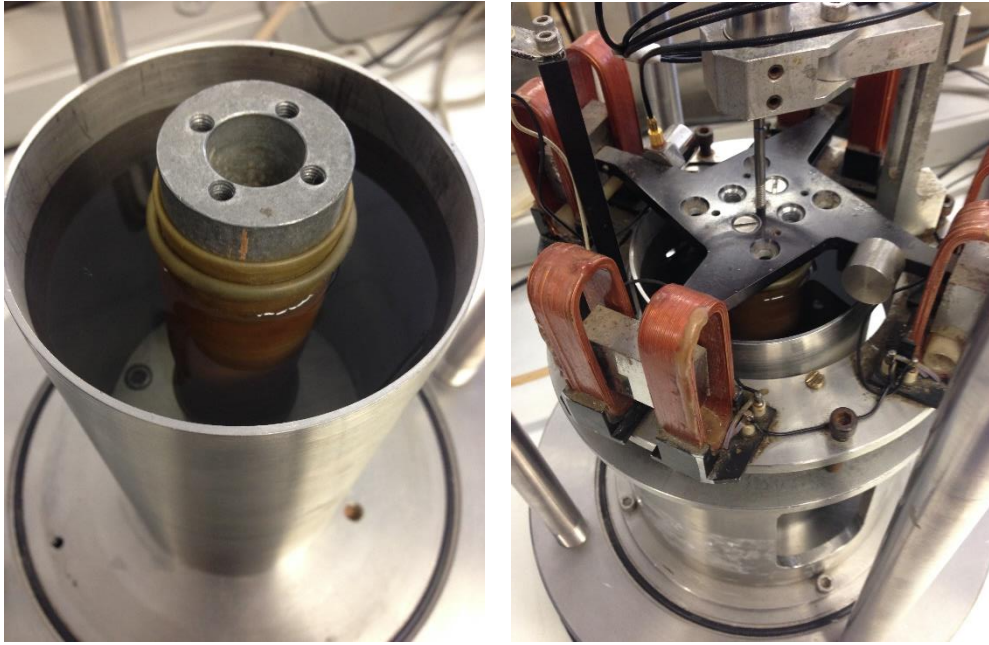


Figura 56. Muestra 17r sumergida en agua para evitar pérdida de humedad

6.4. Ensayo de la probeta en el equipo de columna resonante

Una vez que se ha aplicado la carga de confinamiento de 200 kPa a la probeta, y se ha dejado asentar por 24 horas, se procede al ensayo de columna resonante. Lo primero es encender los equipos y dejarlos calentar aproximadamente 10 minutos, ya que los equipos datan de los años ochenta más o menos. En la figura 57 se puede observar cada parte del equipo de columna resonante, estando en la parte superior el acelerómetro, en la parte intermedia el generador de pulsos y en la parte inferior el osciloscopio.



Figura 57. Partes del equipo de columna resonante. De arriba a abajo: acelerómetro, generador y osciloscopio

A continuación, se comienza tomando nota del valor pico-pico V_{pp} en volts de la señal de excitación que es la que se encuentra en el canal 1 y que normalmente comienza con valores muy bajos de amplitud. En la figura 58 se puede notar el cursor en cada uno de los extremos de la señal de excitación.

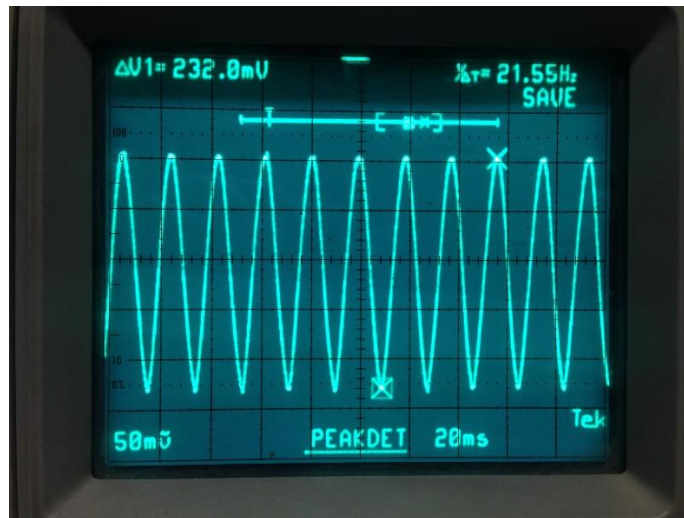


Figura 58. Valor pico-pico de la señal de excitación

Más tarde, se toma nota del valor de la frecuencia de resonancia f_r . Esto se logra poniendo ambos canales a la vez en la pantalla del osciloscopio, y apretando el botón de $x - y$. En dicha pantalla se observa una elipse, como se muestra en la figura 59, la cual debe posicionarse variando la frecuencia del generador de pulsos, para encontrar la mejor posición de la elipse en vertical que satisfaga la resonancia.

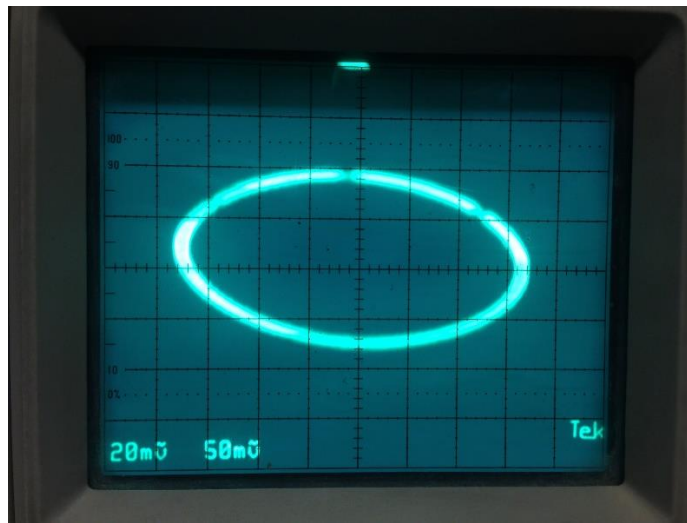


Figura 59. Encontrando la frecuencia de resonancia

Una vez encontrada la resonancia, se vuelve al canal 1 para tomar nota de la frecuencia f_r en Hz . Normalmente se apunta el cursor en las crestas de la señal y se mira la esquina superior derecha para encontrar el valor como se aprecia en la figura 58. Después de esto, se toma nota del valor pico-pico V_{pp} en volts de la señal de respuesta que es la que se encuentra en el canal 2 exactamente igual como se hizo para la señal de excitación en el canal 1.

Por último, se mide el amortiguamiento. Esto se logra soltando el botón de la forma de la onda en el generador de pulsos (así se corta la excitación) y rápidamente apretando el botón “save”, con el fin de detener la imagen a la hora que se hace el amortiguamiento de la probeta como se muestra en la figura 60. Todo esto se hace en el canal 2, que es el canal de la respuesta del material a la sollicitación de carga cíclica.

Para este trabajo final de master, se decidió tomar nota de las diez crestas siguientes a la última cresta antes del amortiguamiento.

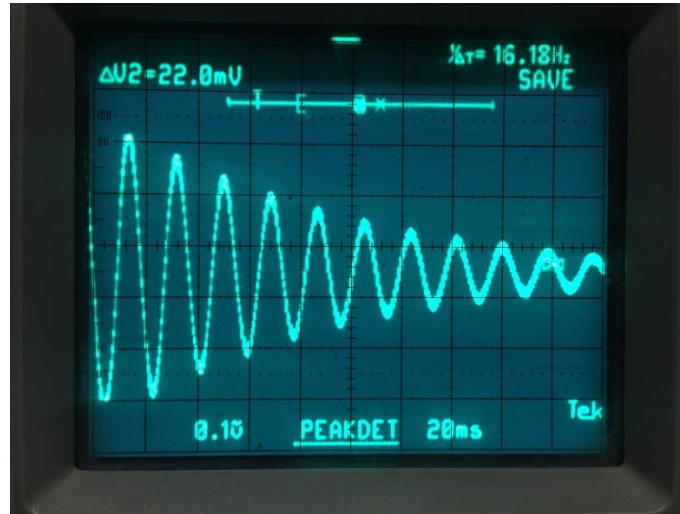


Figura 60. Amortiguamiento del material

Para finalizar, éste proceso de ensayo en el equipo de columna resonante, se repitió ocho veces, para tener datos suficientes con el fin de poder graficar el módulo de corte G y el amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ .

En la tabla 5 se muestran los valores recolectados producto del ensayo de columna resonante de la muestra 6, la cual tiene una densidad seca real de 1.62 Mg/m^3 , una humedad de 8.35% y un grado de saturación de 34.14%.

Tabla 5. Medidas tomadas del ensayo de columna resonante

No.	Valor excitación (Vpp)	Frecuencia resonancia (Hz)	Respuesta acc (Vpp)	Lectura de cada ciclo									
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0,106	75,16	0,068										
2	0,488	74,04	0,644	0,244	0,200	0,168	0,144	0,128	0,108	0,096	0,084	0,076	0,064
3	1,360	68,96	1,192	0,504	0,384	0,304	0,224	0,184	0,144	0,104	0,080	0,072	0,064
4	2,720	66,88	2,500	0,960	0,740	0,540	0,400	0,300	0,220	0,160	0,100	0,080	0,060
5	4,760	63,68	4,160	1,520	0,960	0,820	0,580	0,460	0,340	0,160	0,140	0,100	0,080
6	7,600	60,40	5,680	2,280	1,520	0,960	0,640	0,440	0,280	0,200	0,120	0,080	0,040
7	10,960	56,80	7,360	3,240	2,000	1,200	0,720	0,480	0,320	0,200	0,160	0,120	0,040
8	14,400	52,88	8,560	4,200	2,640	1,480	0,880	0,560	0,360	0,240	0,160	0,120	0,040

6.5. Cronograma de una semana de laboratorio

A continuación, en la tabla 6 se muestra el cronograma de una semana típica de los trabajos de laboratorio. Se puede destacar que, en una semana sin interrupciones, se pudieron ensayar dos probetas y que el tiempo promedio en el laboratorio fue de tres horas diarias. Esto nos da

una cuenta de ciento ochenta horas aproximadamente de laboratorio para ensayar catorce muestras, ya que existieron contratiempos y retrasos que son normales en los trabajos de laboratorio.

Las actividades generales son:

- Preparar material
- Compactar probeta
- Poner la probeta anterior en el equipo de columna resonante
- Ensayar muestra en equipo de columna resonante

Tabla 6. Cronograma de una semana de laboratorio

Trabajo	Día 1			Día 2			Día 3			Día 4			Día 5		
	1 ^a hr	2 ^a hr	3 ^a hr	1 ^a hr	2 ^a hr	3 ^a hr	1 ^a hr	2 ^a hr	3 ^a hr	1 ^a hr	2 ^a hr	3 ^a hr	1 ^a hr	2 ^a hr	3 ^a hr
1. PREPARAR MATERIAL															
Separar material seco según su densidad seca															
Agregar peso de agua según su humedad															
Agregar agua poco a poco e incorporar															
Envolver con plástico y esperar una noche															
2. COMPACTAR PROBETA															
Desarmar molde y agregar aceite															
Armar molde															
Pesar W_{Total} húmedo de la muestra															
Meter W_{Total} húmedo en el molde															
Restante pesar y al horno															
Compactar probeta															
Desmoldar muestra, etiquetar y envolver en plástico															
3. PONER LA PROBETA ANTERIOR EN EL EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE															
Quitar plástico y etiqueta															
Pesar probeta															
Colocar la probeta en su sitio y poner el cabezal															
Agregar la membrana elástica y las liqas															
Colocar todas las piezas del equipo de columna resonante															
Conectar cables, cerrar cámara y confinar a 200 kPa															
Dejar una noche															
4. ENSAYAR MUESTRA EN EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE															
Prender equipos															
Tomar nota del valor pico-pico de la excitación en canal 1															
Obtener la elipse de la frecuencia de resonancia en ambos canales															
Tomar nota del valor de la frecuencia del canal 1															
Obtener el valor pico-pico de la señal de respuesta en el canal 2															
Hacer el damping en el canal 2															
Tomar nota de cada uno de los 10 picos del damping															
Repetir el ciclo 8 veces															
5. PREPARAR MATERIAL															
Sacar restante del horno y pesar															
Separar material seco según su densidad seca															
Agregar peso de agua según su humedad															
Agregar agua poco a poco e incorporar															
Envolver con plástico y esperar una noche															
6. COMPACTAR PROBETA															
Desarmar molde y agregar aceite															
Armar molde															
Pesar W_{Total} húmedo de la muestra															
Meter W_{Total} húmedo en el molde															
Restante pesar y al horno															
Compactar probeta															
Desmoldar muestra, etiquetar y envolver en plástico															
7. PONER LA PROBETA ANTERIOR EN EL EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE															
Quitar plástico y etiqueta															
Pesar probeta															
Colocar la probeta en su sitio y poner el cabezal															
Agregar la membrana elástica y las liqas															
Colocar todas las piezas del equipo de columna resonante															
Conectar cables, cerrar cámara y confinar a 200 kPa															
Dejar una noche															
8. ENSAYAR MUESTRA EN EQUIPO DE COLUMNA RESONANTE															
Sacar restante del horno y pesar															
Prender equipos															
Tomar nota del valor pico-pico de la excitación en canal 1															
Obtener la elipse de la frecuencia de resonancia en ambos canales															
Tomar nota del valor de la frecuencia del canal 1															
Obtener el valor pico-pico de la señal de respuesta en el canal 2															
Hacer el damping en el canal 2															
Tomar nota de cada uno de los 10 picos del damping															
Repetir el ciclo 8 veces															

7. Resultados

En este apartado se presentan únicamente, los parámetros obtenidos, producto de los trabajos realizados en el laboratorio y su debido cálculo. Así como las gráficas correspondientes a dichos parámetros. En el capítulo ocho, se hace el análisis de estos parámetros y sus figuras.

Es recomendable que el lector observe ambos capítulos al mismo tiempo, para poder tener una visión conjunta del comportamiento de la arcilla limosa del llano de Barcelona bajo carga dinámica.

Para comenzar, se presentan las tablas 7 y 8 en las que se hace un resumen de todos los parámetros calculados, en donde se hace una clasificación de cuatro grupos; el primero, es referente al contenido de agua, en donde se muestra el número de probeta, su densidad seca γ_d , la humedad w y el grado de saturación S_r , el segundo, referente a el módulo de corte G y la deformación de corte al 70%, el tercero, se caracteriza por los módulos y muestra los valores del módulo edométrico E_m y un módulo $\frac{\Delta P}{\epsilon}$, y el cuarto, es el concerniente al factor de amortiguamiento D .

Tabla 7. Resumen de los parámetros calculados

Muestra	γ_d	ω	S_r	G_0	$\gamma_{0,7}$	$\frac{\Delta P}{\epsilon}$	E_m
	$\frac{Mg}{m^3}$	%	%	MPa		MPa	MPa
2	1,616	12,92%	52,32%	135,79	1,91E-04	NA	NA
4	1,621	13,34%	54,42%	126,30	2,03E-04	NA	5,557
5	1,622	10,44%	42,62%	173,42	1,87E-04	NA	8,448
6	1,622	8,35%	34,14%	209,34	1,90E-04	NA	15,608
8	1,622	16,61%	67,86%	87,40	1,84E-04	15,166	3,125
9	1,626	14,65%	60,19%	113,36	1,47E-04	12,205	4,426
10	1,727	7,26%	35,02%	267,53	1,29E-04	117,979	33,261
11	1,725	9,15%	44,04%	231,68	1,79E-04	90,939	23,814
12	1,726	12,18%	58,68%	163,90	1,79E-04	62,299	8,638
13	1,734	15,83%	77,17%	119,61	1,71E-04	25,189	2,987
14	1,631	4,53%	18,77%	215,98	1,31E-04	200,994	31,117
15	1,631	17,88%	74,09%	66,20	1,56E-04	18,005	210,250
16r	1,627	20,06%	82,54%	38,55	1,37E-04	40,246	0,970
17r	1,629	23,78%	98,22%	105,04	3,80E-05	96,348	62,520

Tabla 8. Resumen de los parámetros calculados

Muestra	γ_d	ω	S_r	D_0	D_{max}	Diferencia D	D	D
	$\frac{Mg}{m^3}$	%	%			$D_{max} - D_0$	$\gamma = 7E - 03$	$\gamma = 9E - 04$
2	1,616	12,92%	52,32%	0,030	0,189	0,160	1,68E-01	9,27E-02
4	1,621	13,34%	54,42%	0,024	0,334	0,309	2,65E-01	1,31E-01
5	1,622	10,44%	42,62%	0,023	0,342	0,319	2,73E-01	1,38E-01
6	1,622	8,35%	34,14%	0,005	0,386	0,381	2,87E-01	1,34E-01
8	1,622	16,61%	67,86%	0,031	0,265	0,234	2,26E-01	1,22E-01
9	1,626	14,65%	60,19%	0,034	0,264	0,230	2,37E-01	1,36E-01
10	1,727	7,26%	35,02%	0,042	0,235	0,193	2,26E-01	1,38E-01
11	1,725	9,15%	44,04%	0,023	0,276	0,253	2,27E-01	1,19E-01
12	1,726	12,18%	58,68%	0,020	0,368	0,348	2,92E-01	1,47E-01
13	1,734	15,83%	77,17%	0,020	0,362	0,342	2,91E-01	1,49E-01
14	1,631	4,53%	18,77%	0,014	0,481	0,467	3,91E-01	2,10E-01
15	1,631	17,88%	74,09%	0,055	0,214	0,159	2,18E-01	1,35E-01
16r	1,627	20,06%	82,54%	0,034	0,384	0,350	3,32E-01	1,87E-01
17r	1,629	23,78%	98,22%	0,016	0,389	0,373	3,68E-01	2,71E-01

A continuación, se presentan las figuras 61, 62, que muestran el comportamiento del módulo de corte inicial G_0 en función de: la densidad seca γ_d , la humedad w y el grado de saturación S_r , además, en las figuras 63 y 64 se muestra el comportamiento del módulo de corte G en función de la deformación de corte γ .

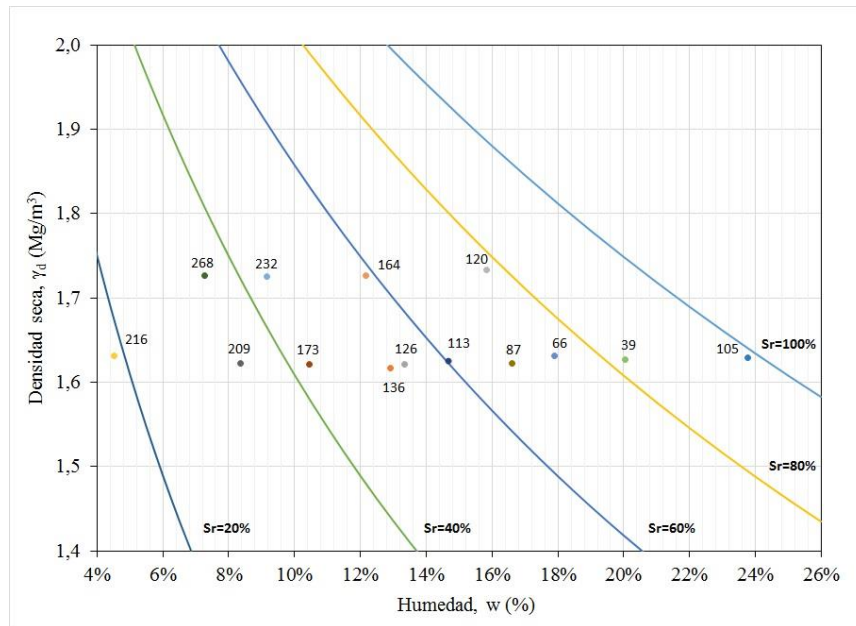


Figura 61. Módulo de corte inicial G_0 en función de la densidad seca γ_d y la humedad w

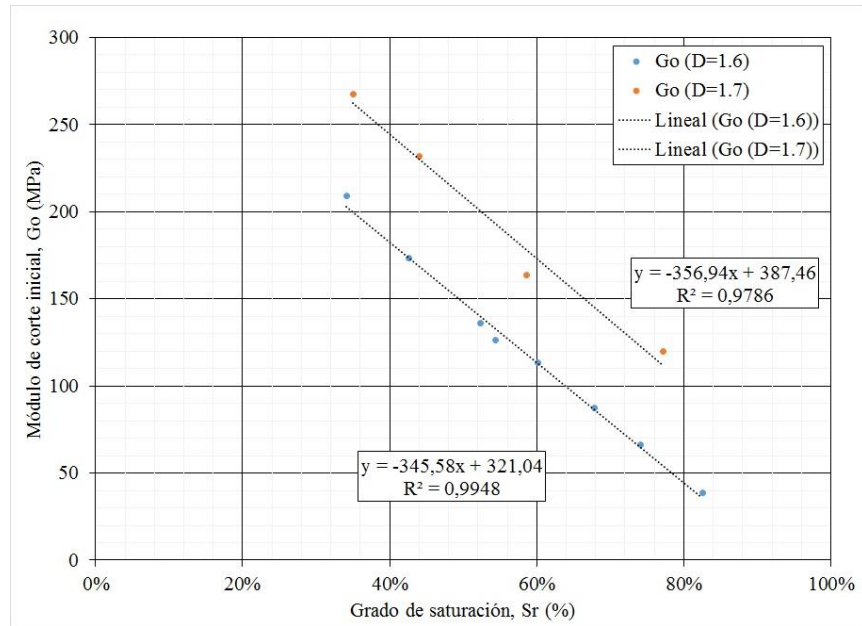


Figura 62. Módulo de corte inicial G_0 en función del grado de saturación S_r , para muestras con densidades secas γ_d de 1.6 Mg/m^3 y 1.7 Mg/m^3

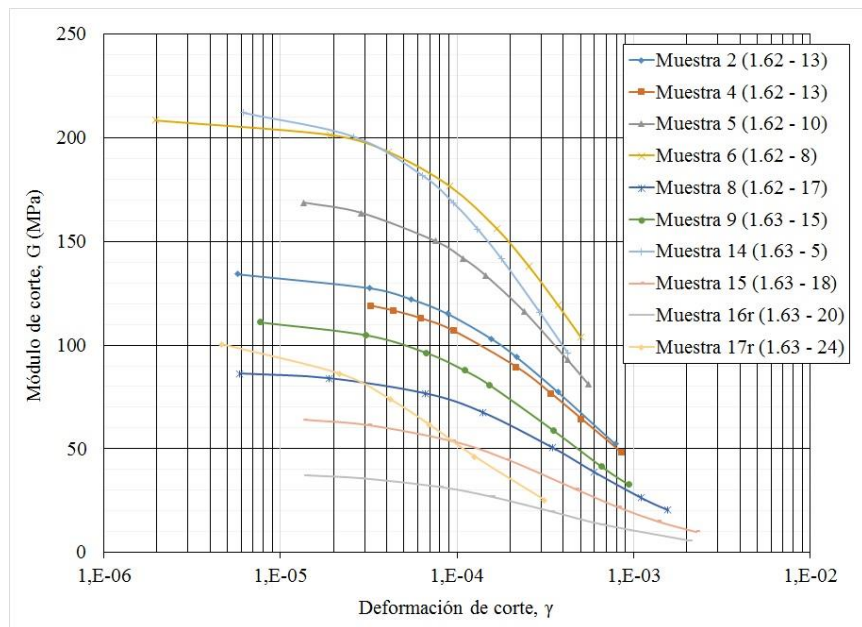


Figura 63. Módulo de corte G en función de la deformación de corte γ para muestras con densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3

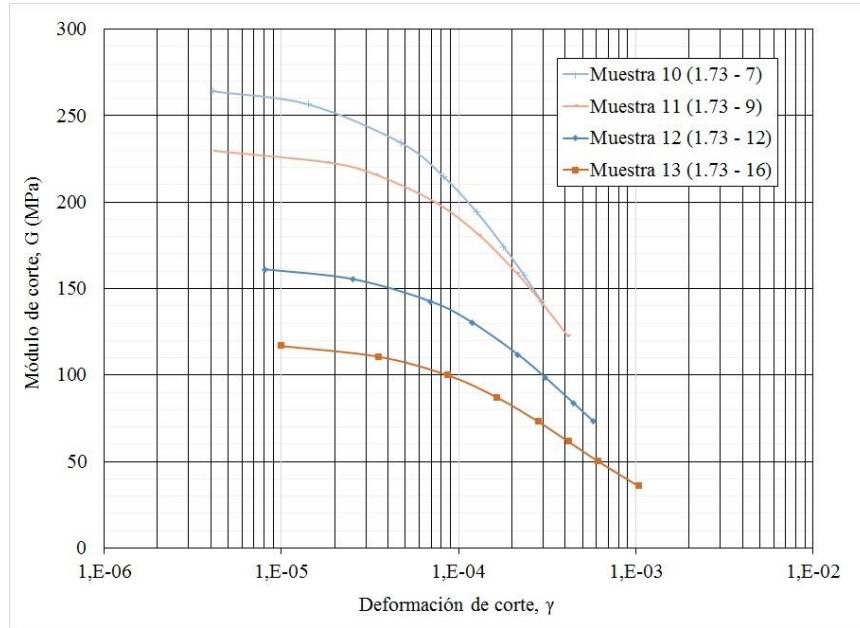


Figura 64. Módulo de corte G en función de la deformación de corte γ para muestras con densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3

Ahora, se muestran las figuras 65, 66 que indican el comportamiento del factor de amortiguamiento máximo D_{max} y el factor de amortiguamiento inicial D_0 en función de: la densidad seca γ_d , la humedad w ; así como las figuras 67, 68 que muestran el factor de amortiguamiento D , de cierta deformación de corte γ en función de: el grado de saturación S_r , y las figuras 69 y 70 que indican el comportamiento del factor de amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ .

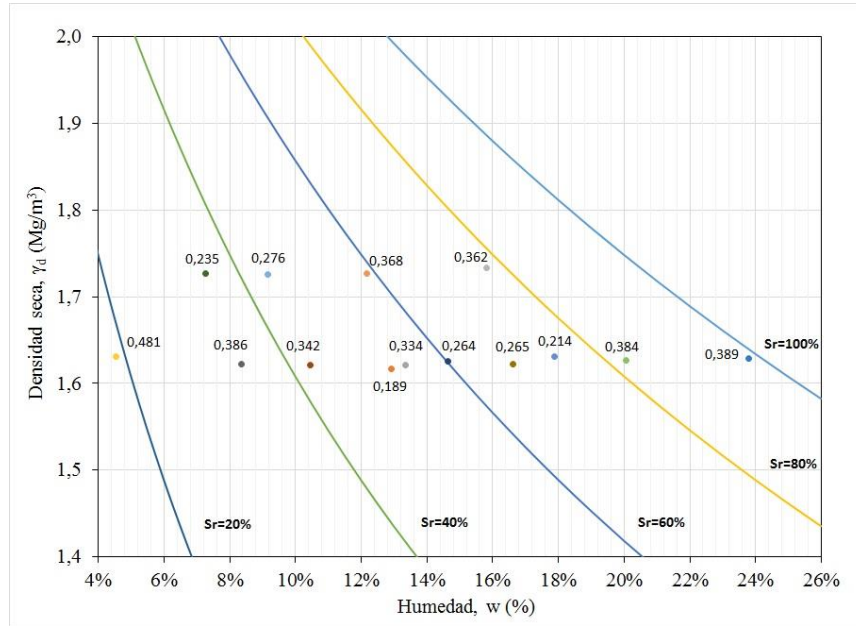


Figura 65. Factor de amortiguamiento máximo D_{max} en función de la densidad seca γ_d y la humedad w

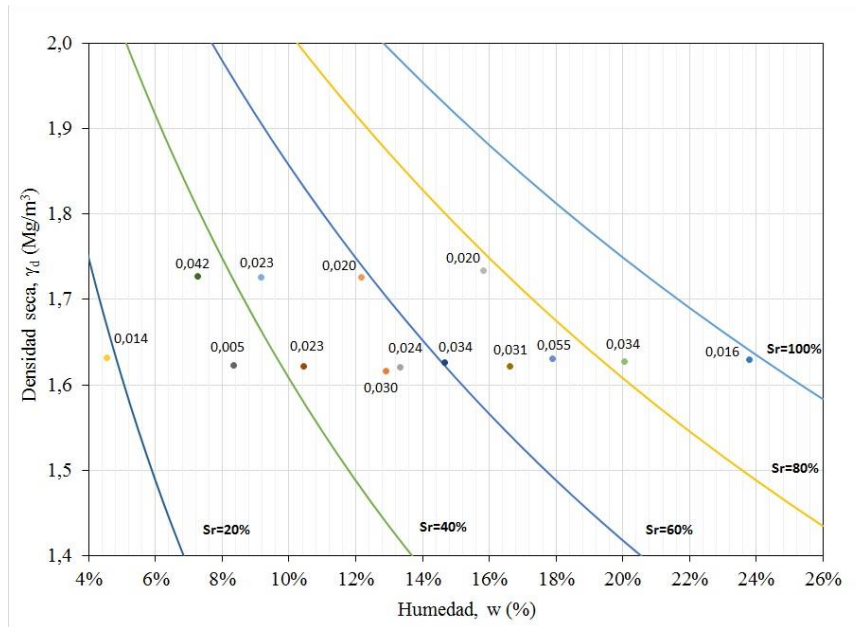


Figura 66. Factor de amortiguamiento inicial D_0 en función de la densidad seca γ_d y la humedad w

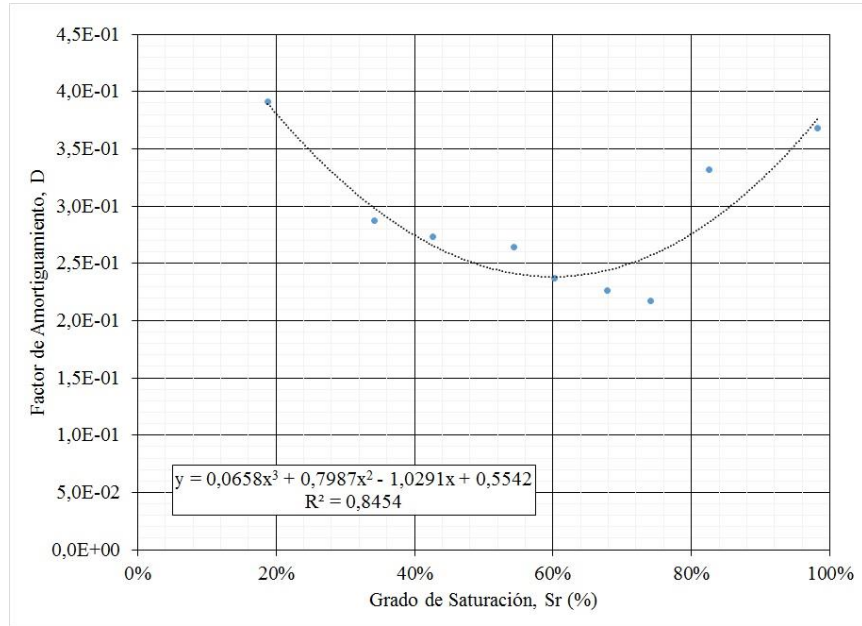


Figura 67. Variación del factor de amortiguamiento D en función del grado de saturación S_r para una deformación de corte γ de $7E-03$ en muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3

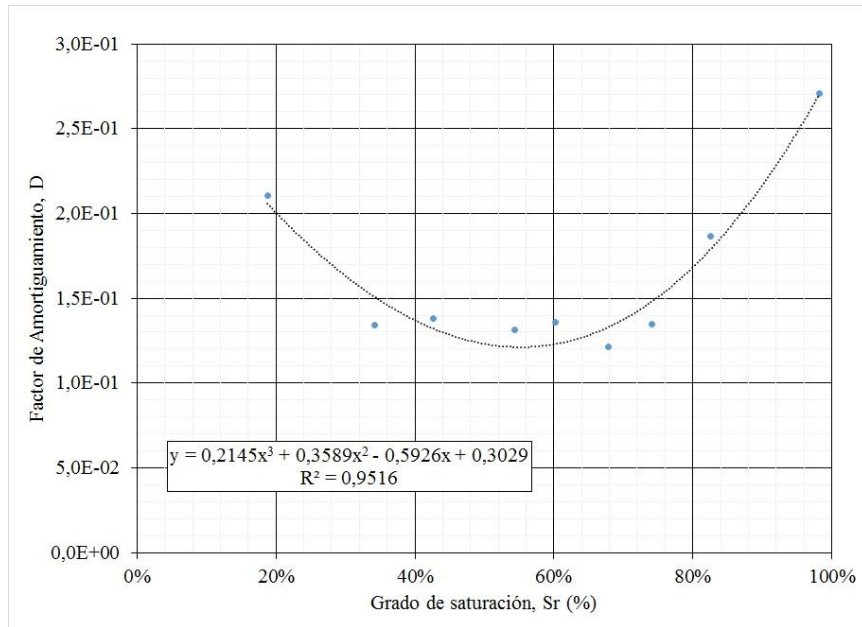


Figura 68. Variación del factor de amortiguamiento D en función del grado de saturación S_r para una deformación de corte γ de $9E-04$ en muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3

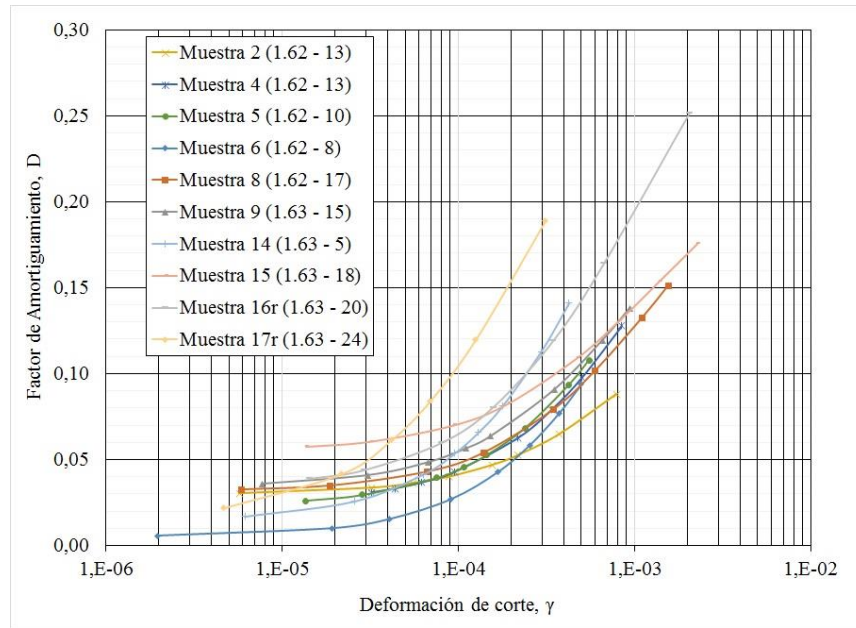


Figura 69. Factor de amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ para muestras con densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3

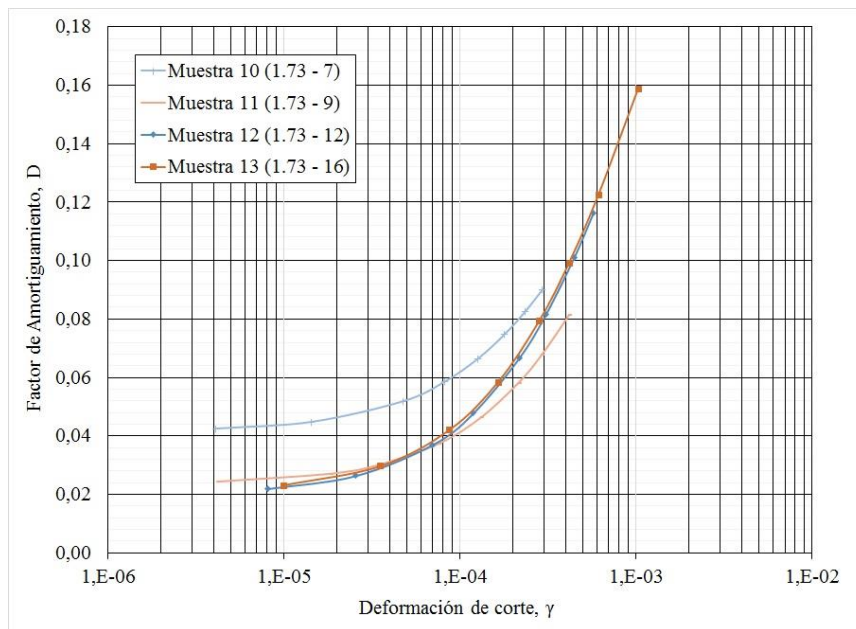


Figura 70. Factor de amortiguamiento D en función de la deformación de corte γ para muestras con densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3

Después de mostrar los parámetros más importantes que son el módulo de corte G y el factor de amortiguamiento D , ahora se mostrarán parámetros que se obtuvieron debido a la

manipulación de los datos, como es el caso de las figuras 71 y 72 donde se muestra la tensión de corte τ en función de la deformación de corte γ y las figuras 73 y 74 que muestran la tensión de corte τ del modelo hiperbólico, en función de la deformación de corte γ .

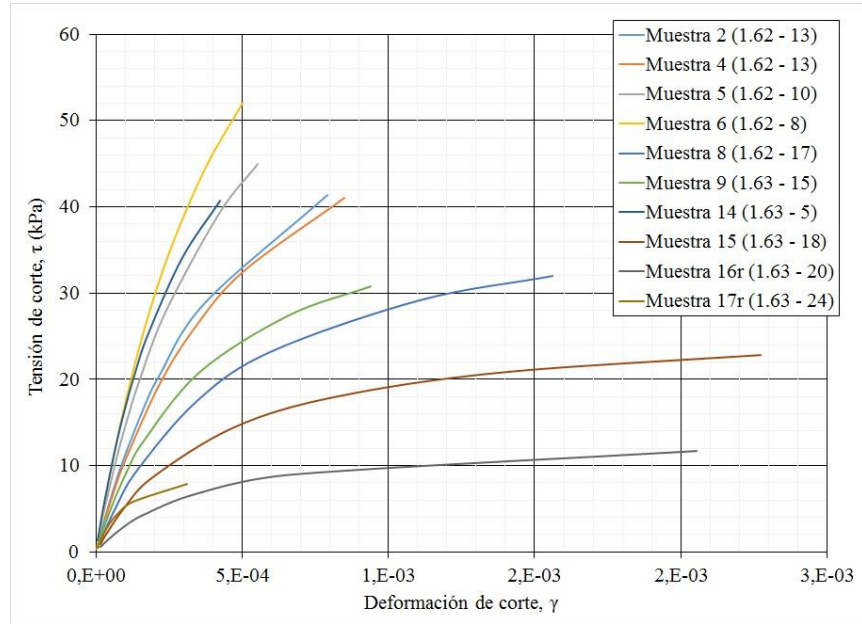


Figura 71. Tensión de corte τ en función de la deformación de corte γ para muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3

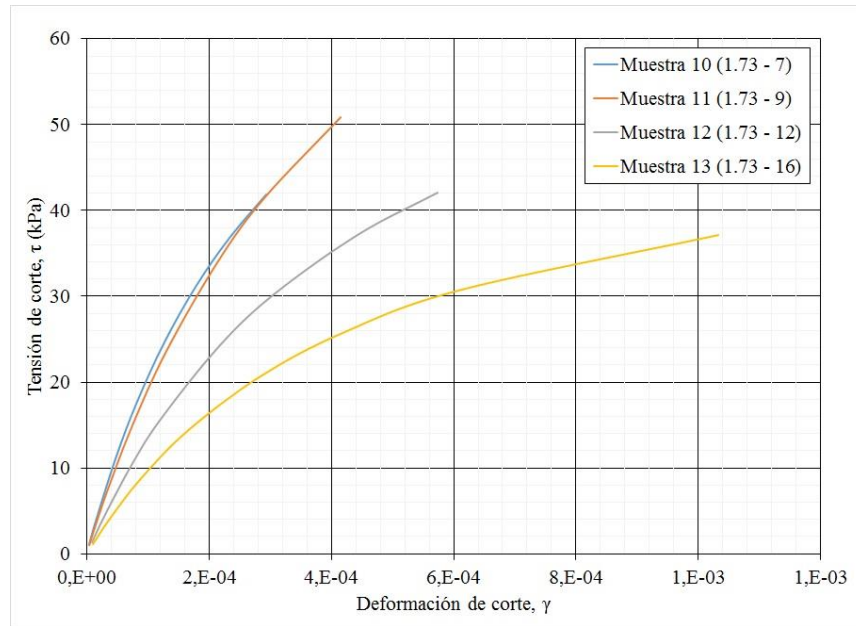


Figura 72. Tensión de corte τ en función de la deformación de corte γ para muestras con una densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3

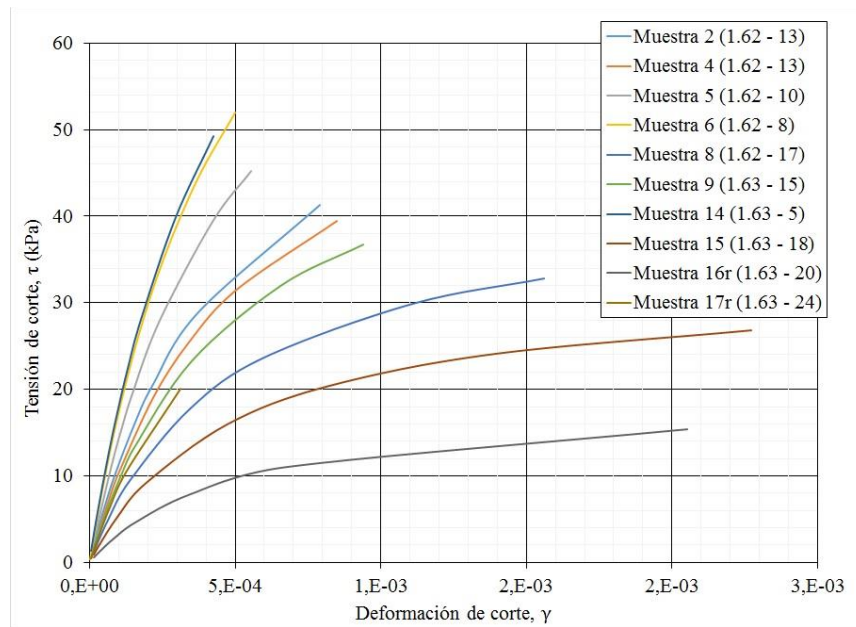


Figura 73. Tensión de corte τ del modelo hiperbólico, en función de la deformación de corte γ para muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3

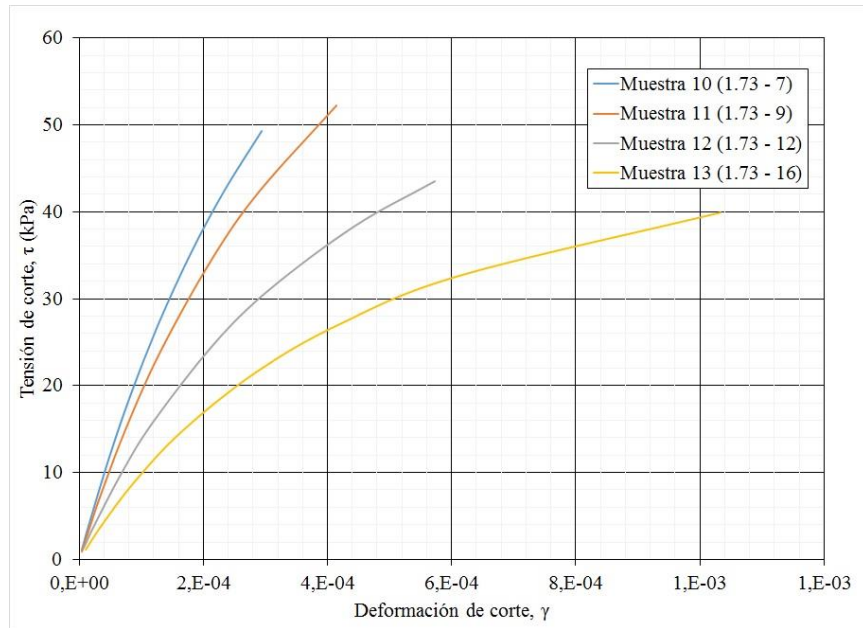


Figura 74. Tensión de corte τ del modelo hiperbólico, en función de la deformación de corte γ para muestras con una densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3

Ahora bien, a partir de este momento se mostrarán parámetros obtenidos como el mostrado en la figura 75, que es de la deformación de corte al 70% en función de la densidad seca γ_d y la humedad w , y el obtenido en la figura 76, que es el módulo $\frac{\Delta P}{\varepsilon}$ obtenido en las muestras con el LVDT en el aparato de columna resonante en función del grado de saturación S_r , así como el de la figura 77, que es el módulo edométrico E_m en función del grado de saturación S_r , que surge a partir de la compactación estática.

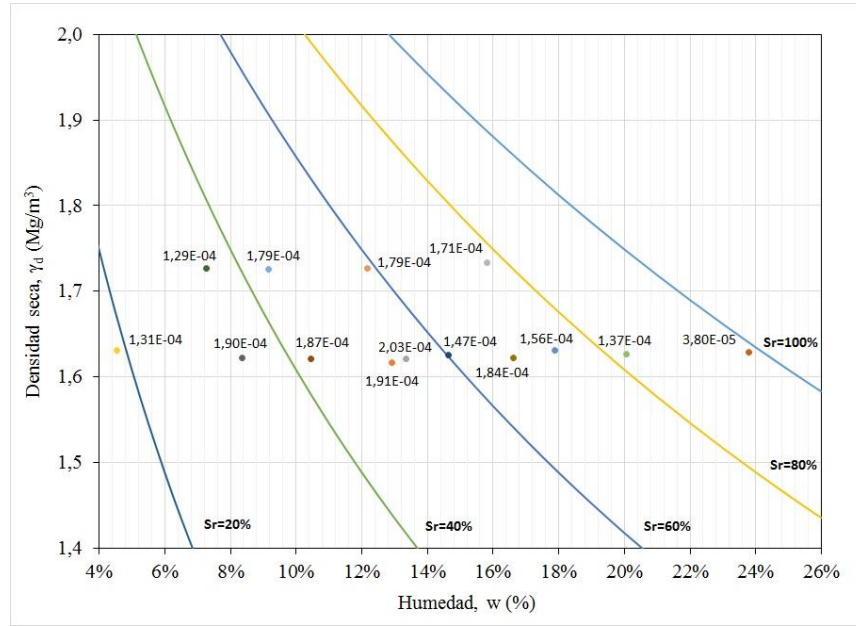


Figura 75. Deformación de corte al 70% $\gamma_{0.7}$ en función de la densidad seca γ_d y la humedad w

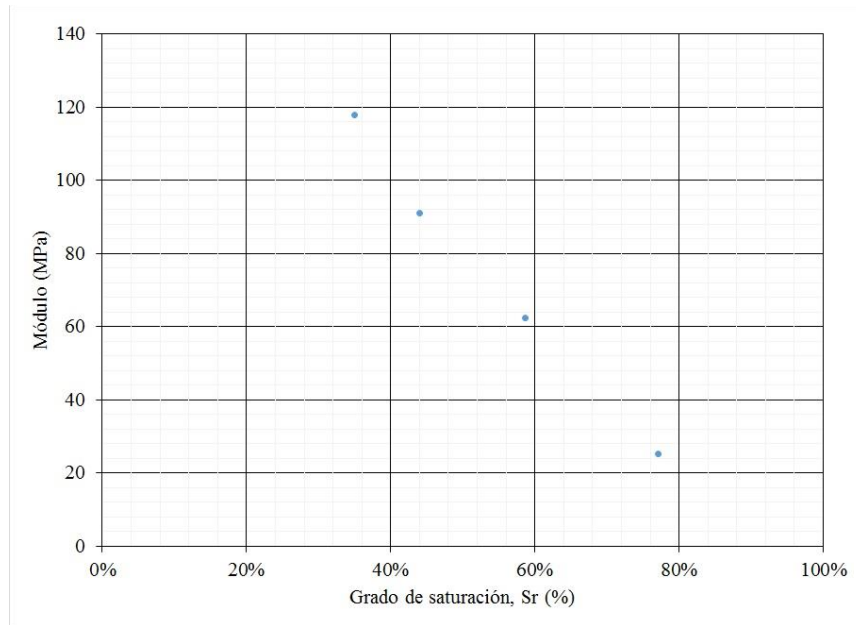


Figura 76. Módulo $\Delta P/\epsilon$ en función del grado de saturación S_r , para muestras con una densidad seca γ_d de 1.7 Mg/m^3

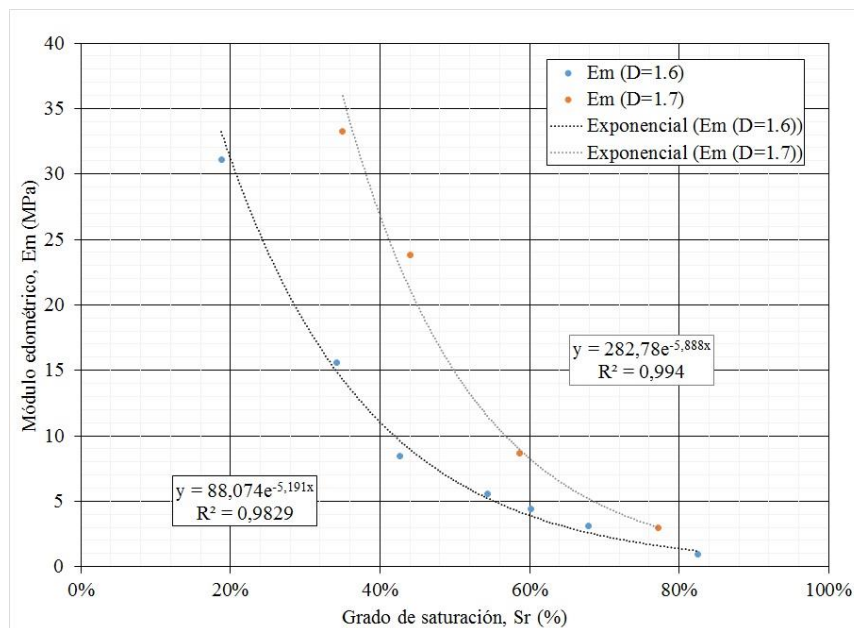


Figura 77. Módulo edométrico E_m en función del grado de saturación S_r

8. Análisis de los resultados

Se puede ver que, para ambos extremos de la figura 61 el módulo de corte inicial se sale de la tendencia lineal que lleva, lo que pone en duda su comportamiento tanto en condiciones muy secas como muy húmedas. En la figura 78 se puede observar esto en ambos extremos de la saturación.

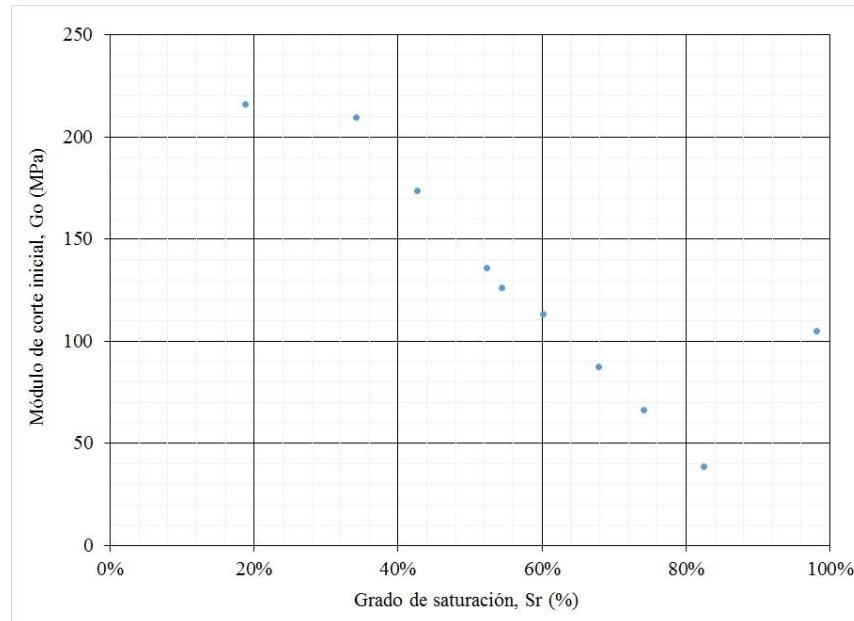


Figura 78. Módulo de corte inicial G_0 en función del grado de saturación S_r , para muestras con densidades secas γ_d de 1.6 Mg/m^3

Además, se puede notar en la figura 62 las tendencias casi paralelas de ambos casos de densidades secas para el módulo de corte inicial en función de la saturación, con pendientes que se parecen en un 97%. Lo que deja de manifiesto que, a mayor densidad seca, mayor será el módulo de corte inicial.

En la figura 63 se observa la evolución de la curva del módulo de corte frente a la deformación de corte. En dicho gráfico se puede notar que, a menor grado de saturación, mayor es el módulo de corte o rigidez, y que el cambio del módulo de corte en función de la deformación es más rápido, que en muestras más saturadas y con menor módulo de corte,

además se puede ver que las muestras en condiciones extremas como la muestra 14 y la 17r, tienen comportamientos fuera de los esperado.

Por otro lado, en la figura 65 no se alcanza a apreciar la evolución curva que debería de tener el factor de amortiguamiento máximo, misma evolución que no se aprecia por el plano en el que están dibujados los valores, pero que, a grandes rasgos, si se puede notar en la figura 79. En esta figura, se observa bien la poca variación del factor de amortiguamiento inicial, misma que no se alcanza a observar con claridad en la figura 66, pero en la figura 79 si, donde podemos ver que la desviación estándar σ del factor de amortiguamiento inicial es de 0.0138 para las muestras con una densidad seca de 1.6 Mg/m^3 , y 0.0102 para las muestras con una densidad seca de 1.73 Mg/m^3 , y esto es una medida de la dispersión de este parámetro que debería de permanecer constante. Dichos números, nos dicen que existe muy poca variación entre los valores del factor de amortiguamiento inicial, tomando en cuenta que el promedio es de 0.027 y 0.026 respectivamente.

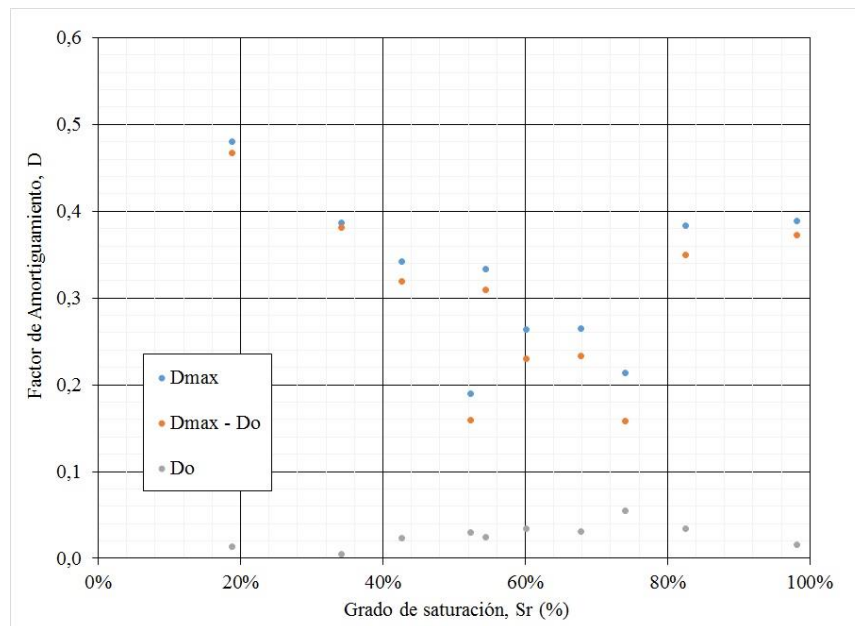


Figura 79. Variación del factor de amortiguamiento D en función del grado de saturación S_r , en muestras con una densidad seca γ_d de 1.6 Mg/m^3

Se puede apreciar, tanto en la figura 67 como en la figura 68 una tendencia cúbica del factor de amortiguamiento en función del grado de saturación, sólo para ciertas deformaciones de

corte predichas. En ambos casos existe error, sin embargo, la figura 67 es la que más error tiene.

En la figura 69 se observa todos los factores de amortiguamiento calculados para una densidad seca de 1.6 Mg/m^3 y en la figura 70 para una densidad seca de 1.73 Mg/m^3 en función de la deformación de corte, misma que se ubica en un rango de $9\text{E-}02$ a $5\text{E-}05$. De dichas gráficas podemos analizar que, a mayor contenido de agua, el factor de amortiguamiento es mayor.

De las figuras 71 y 72, sólo podemos decir que la tensión de corte máxima estuvo sobre los 50 kPa , siendo la muestra 6 y 11 las que más resistieron con humedades del 8 y 9% respectivamente. Lo que me lleva a pensar que la arcilla limosa del llano de Barcelona tiene su mejor respuesta ante tensión de corte sobre grados de saturación de entre el 34 y 44% .

Por otro lado, en la figura 73 y figura 74 solo se muestran las tensiones de corte en función de la deformación de corte usando el modelo hiperbólico de la ecuación 22, y se puede resaltar que la deformación de corte máxima se encuentra en la muestra 15 con $2.3\text{E-}03$, la cual tiene un grado de saturación del 74% .

$$\tau = \frac{\gamma}{\frac{1}{G_0} + \frac{\gamma}{\tau_f}} = \frac{G_0 \gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (22)$$

El módulo $\frac{\Delta P}{\epsilon}$ decrece con el aumento de la saturación. Eso es lo que muestra la figura 76 ya que las probetas al estar más saturadas se deforman más, haciendo decrecer el módulo. Este efecto se notó bien en las muestras con densidad seca de 1.73 Mg/m^3 .

Para finalizar, el módulo edométrico de la figura 77 también decrece con el aumento de la saturación siguiendo una tendencia exponencial bastante bien ajustada. Así mismo, esta figura deja ver que los módulos edométricos son mayores cuando la densidad seca del material es mayor.

9. Conclusiones

En este trabajo final de master se buscó analizar la variación de los parámetros dinámicos frente a la deformación y la saturación de la arcilla limosa del llano de la ciudad de Barcelona, con dos diferentes densidades secas. La determinación de dichos parámetros a pequeñas deformaciones, las cuales estuvieron en un rango aproximado de entre $9E-02$ y $5E-05$, se obtuvieron bajo carga cíclica aplicada por el aparato de columna resonante.

Se concluye que, el módulo de corte aumenta cuando existe un aumento de la densidad seca del suelo y decrece al aumentar la deformación. Por otro lado, decrece al aumentar el grado de saturación y también aumenta, para un mismo nivel de grado de saturación, si la densidad seca aumenta. La velocidad de decrecimiento con respecto a la deformación es mayor en suelos menos saturados que en aquellos con más saturación.

El factor de amortiguamiento decrece a medida que aumenta la densidad seca del suelo, es decir, al ser más rígido el suelo, menos factor de amortiguamiento tiene. Además, aumenta para una misma densidad seca, a medida que aumenta su grado de saturación.

La tensión de corte que admite el suelo, aumenta al disminuir el grado de saturación, y el módulo edométrico decrece con el aumento de la saturación. La tensión de corte también aumenta para un mismo nivel de saturación en función de su densidad seca.

No se pudo visualizar con certeza una tendencia lógica de la deformación de corte al 70% con respecto al grado de saturación, ni en las muestras con densidad seca de 1.6 Mg/m^3 ni aquellas de 1.73 Mg/m^3 , es posible que existan algunas medidas mal hechas debido a las limitaciones naturales del aparato de columna resonante. Para el módulo de la carga de confinamiento con respecto a su deformación, sólo se puede decir que disminuye al aumentar el grado de saturación del suelo.

Para analizar y estudiar el suelo a grandes deformaciones y obtener los parámetros dinámicos del suelo, se recomienda utilizar el péndulo de torsión de (Zeevaert, 1967). Para el caso extremo de saturación total, se recomienda utilizar equipo adecuado para suelos saturados, que den la tensión de confinamiento con agua y no con aire, como se hace actualmente.

10. Futuras líneas de investigación

1. Estudiar mejor la variación del módulo edométrico ante la saturación del suelo, para obtener modelos que describan su comportamiento a lo largo de toda la gama posible de saturación.
2. Investigar por qué la variación de la deformación de corte al 70% no es tan clara frente al grado de saturación del suelo para diferentes densidades secas.
3. Dedicar una tesis completa a estudiar el comportamiento del módulo de corte entre el 80% y el 100% de saturación.
4. Estudiar el cambio que sucede en el módulo ante el grado de saturación para diferentes densidades secas, y para diferentes tensiones de confinamiento, para obtener modelos que puedan describir cómo se comporta el material.
5. Investigar a detalle qué sucede con el módulo de corte inicial en los extremos de la tendencia lineal en función del grado de saturación, tanto para grados de saturación por debajo del 30% como por encima del 85%.
6. Corroborar la tendencia curva del factor de amortiguamiento en función de la saturación del suelo para cierta deformación de corte impuesta.
7. Estudiar el comportamiento del factor de amortiguamiento máximo frente a la saturación del suelo.

11. Referencias

Alonso, E., 2004. *Suelos compactados en la teoría y en la práctica*, Barcelona: Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. UPC.

Alonso, E., Pereira, J. M., Vaunat, J. & Olivella, S., 2010. A microstructurally based effective stress for unsaturated soils. *Géotechnique*, 60(12), pp. 913-925.

Alonso, E., Pinyol, N. M. & Gens, A., 2013. Compacted soil behaviour: initial state, structure and constitutive modelling. *Géotechnique*, 63(6), pp. 463-478.

Atkinson, J. M. & Salfords, G., 1991. Experimental determination of stress-strain-time characteristic in laboratory and situ test. *Proceedings X ECSMFE*, Volumen 3, pp. 915 - 956.

CIMNE-UPC-GEOLAB, 2014. *Small-strain stiffness of statically compacted MX-80 bentonite using resonant column tests*, Barcelona: s.n.

Díaz Rodríguez, A., 2005. Ensayo de columna resonante. En: Noriega, ed. *Dinámica de Suelos*. México: Limusa, pp. 129 - 131.

Dyvik, R., 2010. *Understanding the measurement of soil dynamic properties*. [En línea] Available at: <https://workspace.imperial.ac.uk/geotechnics/public/2.%20R%20Dyvik's%20talk%2017%20March%202010.pdf>

[Último acceso: 24 Agosto 2016].

Gens, A., Alonso, E., Surlol, J. & Lloret, A., 1995. Effect of structure on the volumetric behaviour of a compacted soil. En: *Proc. 1st Int. Conf. on Unsaturated Soils, Paris*. Rotterdam: Balkema, pp. 1: 83-88.

Gesto, J. M., Gens, A. & Vaunat, J., 2011. Smoothing of yield surfaces and a reformulation of multi-surface plasticity. En: *Proc. 11th Int. Conf. on Computational Plasticity: Fundamentals and Applications (COMPLAS XI)*. Barcelona, Spain: s.n., pp. 295-306.

Hardin, B. & Black, W., 1969. Closure to vibration of normally consolidate clay. *Proc. of ASCE*, 95(SM6), pp. 1531 - 1537.

Hardin, B. O. & Drnevich, V. P., 1972. Shear modulus and damping in soils I, measurements and parameters effects. *Journal of SMF Div., Proc., ASCE*, 98(SM6), pp. 603-624.

Ishibashi, 1992. Discussion to effect of soil pasticity on cicly responsen by M. Vucetic and Dobry. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 118(5), pp. 830 - 832.

Lloret, A., 2012. *Modelos dinámica de suelos*. Barcelona: s.n.

Mononobe, H., 1936. Seismic stability of earth dam. *Proc. 2nd Int. Congr. Large Dams*, Volumen IV.

Mononobe, N. & Matsuo, M., 1929. On tne determination of earth pressures durig earthquakes. *Proc. World Eng. Congr.*, Volumen 9, p. 174.

Okamoto, S., 1973. En: J. W. a. Sons, ed. *Introduction to earthquake engineering*. New York: s.n., pp. 3 - 32.

Rodríguez Segurado, M., 2005. *Caracterización de la respuesta sísmica de los suelos. Aplicación a la ciudad de Barcelona*. Barcelona, España: s.n.

Romero, E., 2013. A microstructural insight into compacted clayey soils and their hydraulic properties. *Engineering Geology*, Issue 165, pp. 3-19.

Romero, E. & Vaunat, J., 2000. *Retention curves in deformable clays*. Rotterdam, the Netherlands, A. A. Balkema, pp. 91-106.

Saita, T. & Suzuki, M., 1934. On the upper surface and underground seismic disturbances in downtown Tokyo. *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 12(3).

Santos, J. A. & Correia, A. G., 2001. Reference threshold shear strain of soil, its application to obtain a unique strain-dependent shear modulus curve of soil. En: *Proceedings 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Istanbul: s.n., pp. 267-270.

Seed, H. B. & Iddris, L. M., 1967. Analysis of liquefaction, Niigata Earthquake. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 93(3), pp. 83 - 108.

Seed, H. B. & Lee, K. L., 1966. Liquefaction of saturated sand during cyclic loading. *ASCE Journal of the Soil mechanics and Foundation Division*, 92(6), pp. 105 - 134.

Sezawa, K. & Kanai, K., 1935. Decay in the seismic vibration on a simple or tall structure by dissipation of their energy into the ground. *Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ.*, 13(3), pp. 681 - 697.

Suriol Castellví, J., 1993. Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de columna resonante. *Revista de obras públicas*, pp. 57 - 66.

Suriol, J., Gens, A. & Alonso, E., 1998. Behaviour of compacted soils in suction-controlled oedometer. En: *Proc. 2nt Int. Conf. on Unsaturated Soils*. Beijing: International Academic Publishers, pp. 1: 436-443.

Suriol, J. & Lloret, A., 2007. Cambios en la estructura de suelos compactados frente al humedecimiento y secado. *Ingeniería Civil*, pp. 147: 7-76 (in Spanish).

Suriol, J. & Lloret, A., 2007. *Estudio comparativo de la deformabilidad de suelos compactados mediante el equipo de columna resonante*, Barcelona: s.n.

Suriol, J., Romero, E., Lloret, A. & Vaunat, J., 2014. *Small-strain shear stiffness of compacted clays: Initial state and microstructural features*, Barcelona, Spain: Department of Geotechnical Engineering & Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

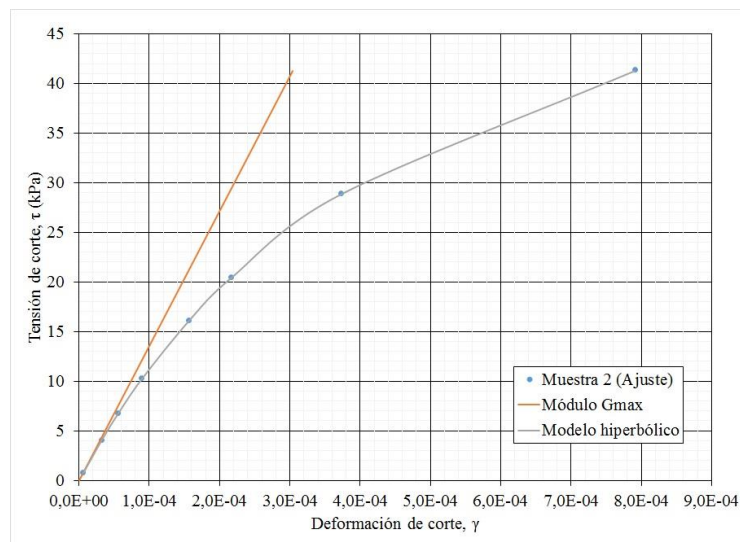
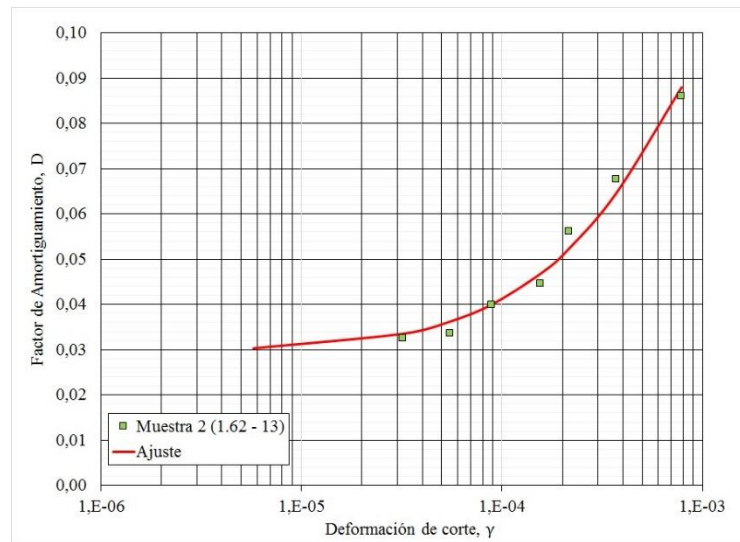
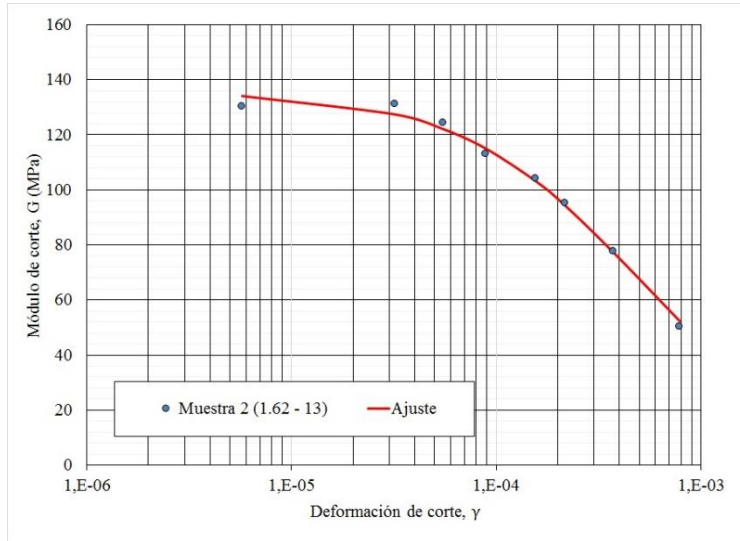
Tarantino, A. & Tombolato, S., 2005. Coupling of hydraulic and mechanical behaviour in unsaturated compacted clays. *Géotechnique*, 55(4), pp. 307-317.

Vucetic, R. & Dobry, R., 1991. Effect of soil pasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117(1), pp. 89 - 107.

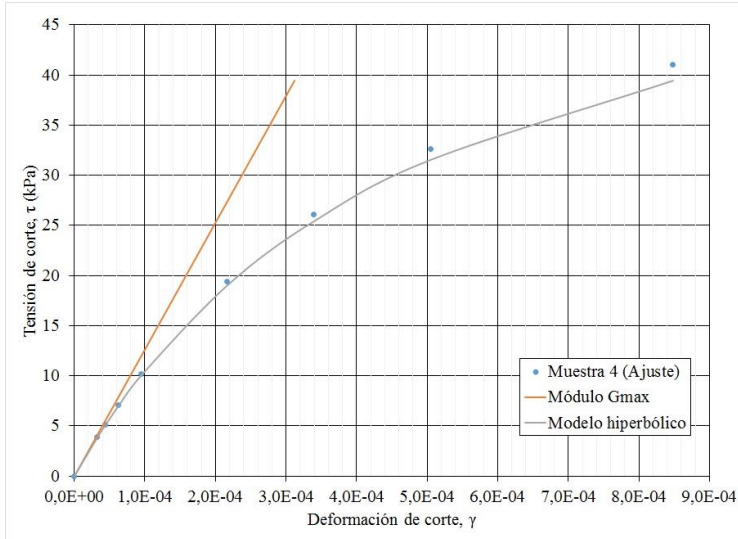
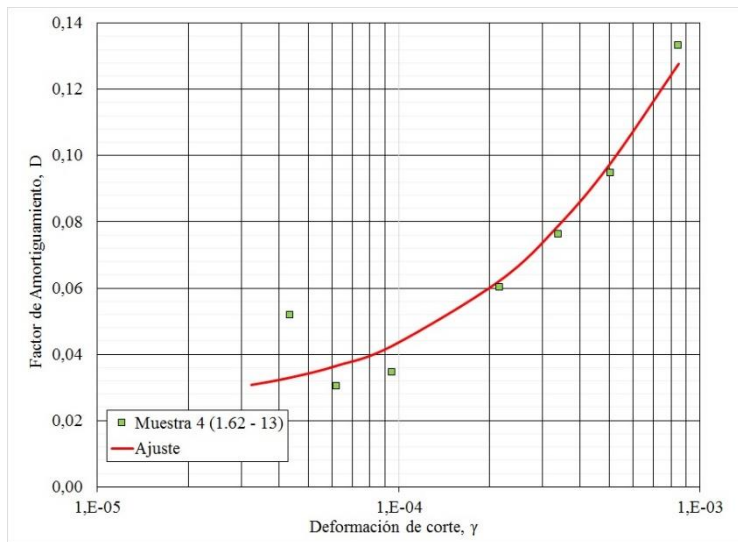
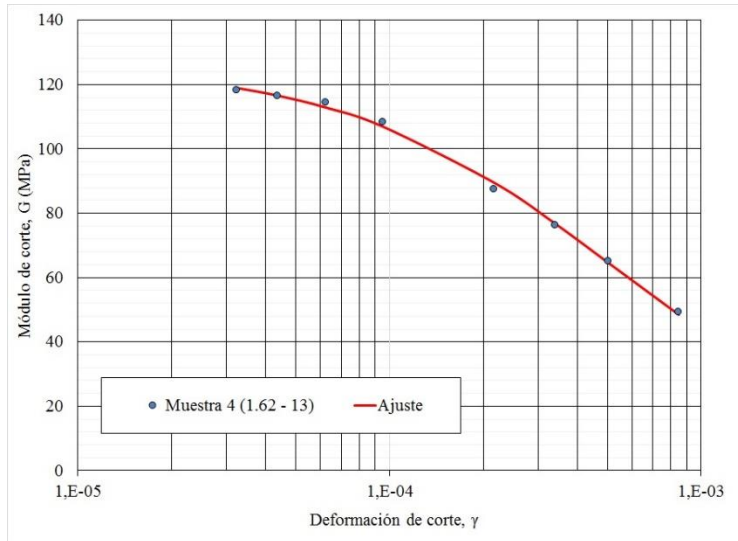
Zeevaert, L., 1967. Free vibration torsion test to determine the shear modulus of elasticity on soils. *Proc. 3rd Panamerican Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng.* , Volumen 1, pp. 111 - 129.

12. Anexos

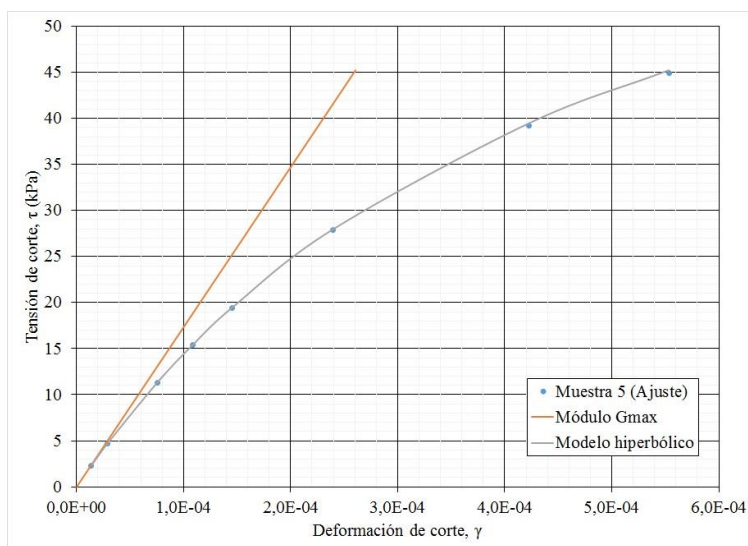
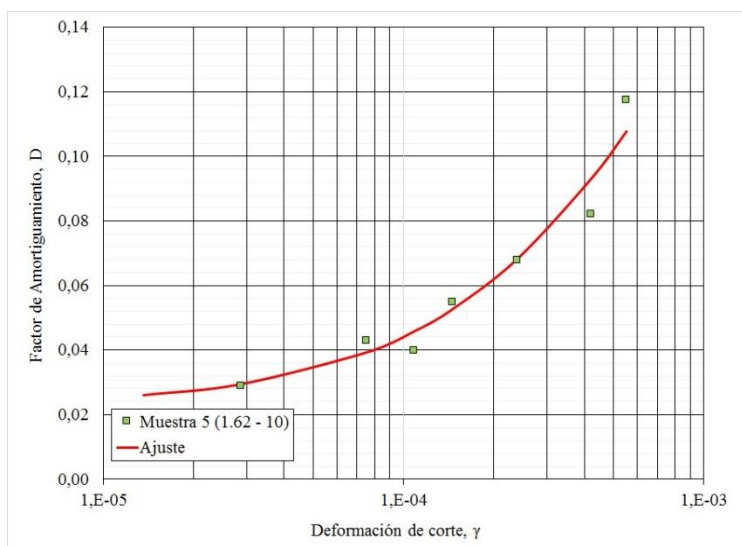
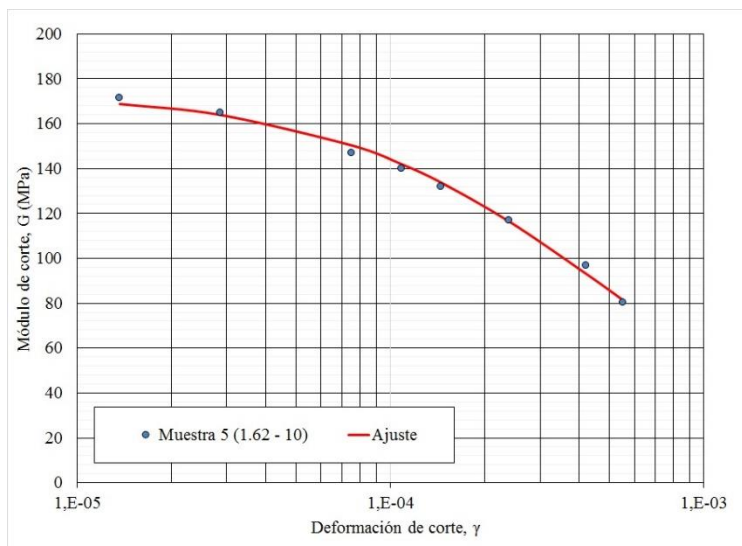
Muestra 2



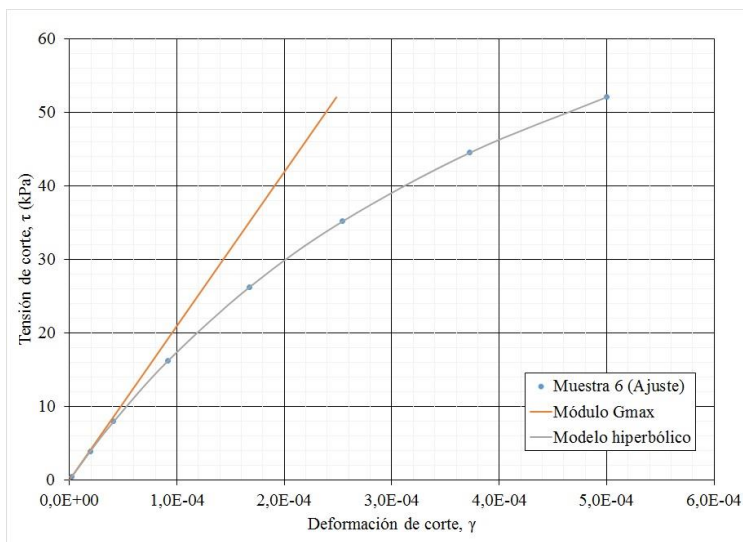
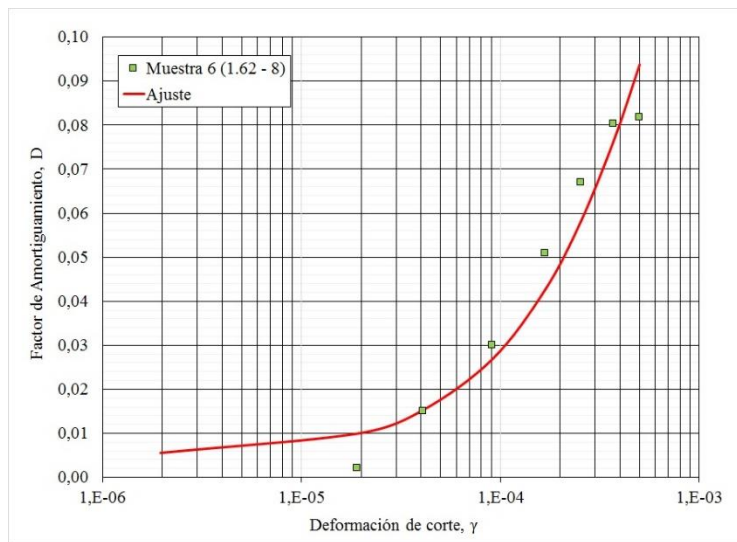
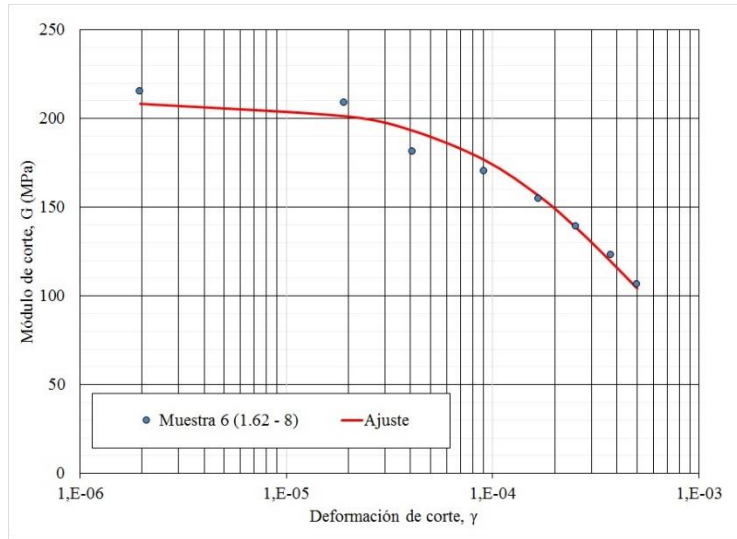
Muestra 4



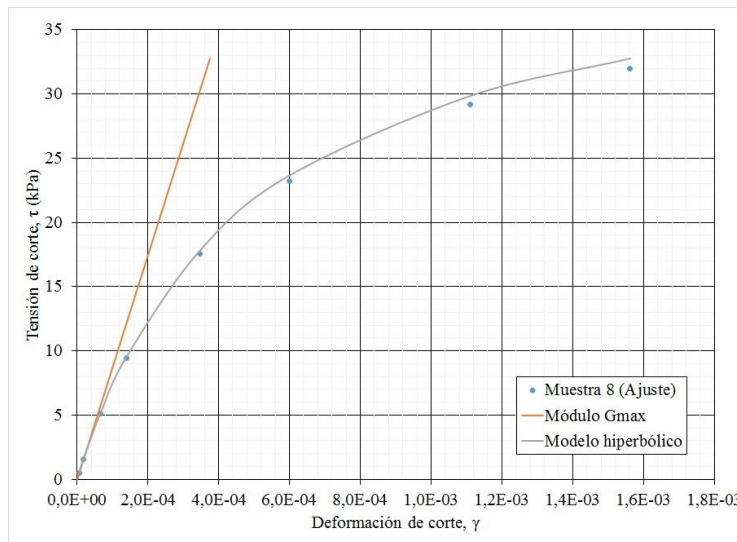
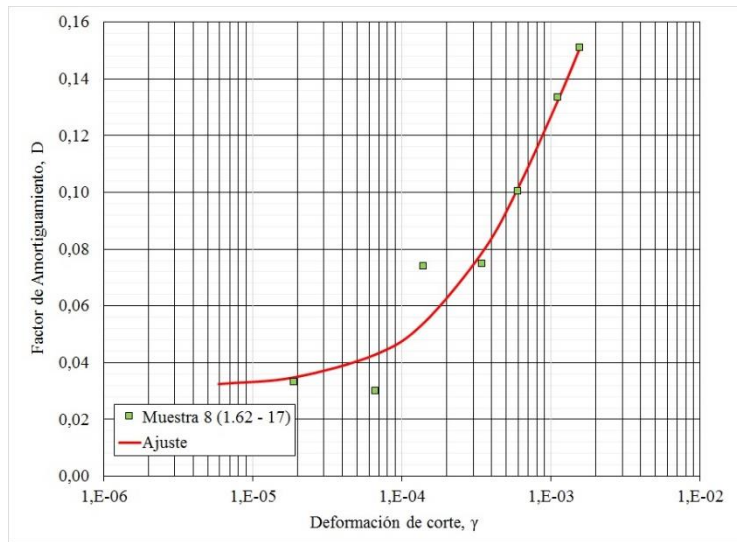
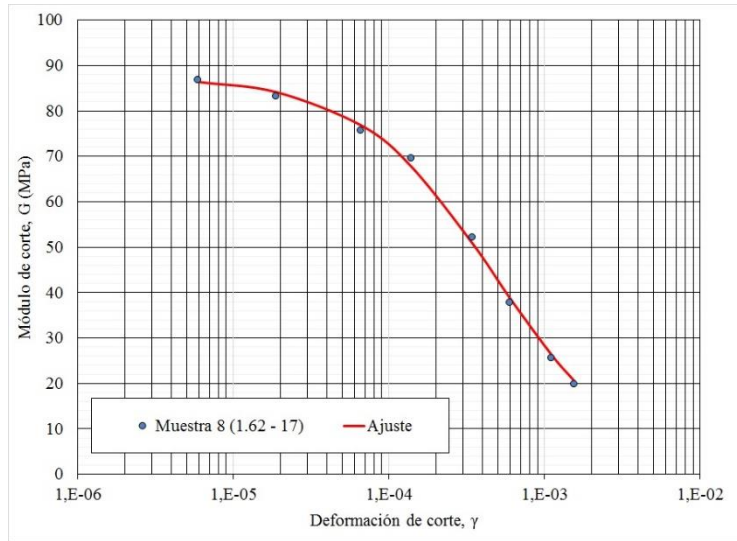
Muestra 5



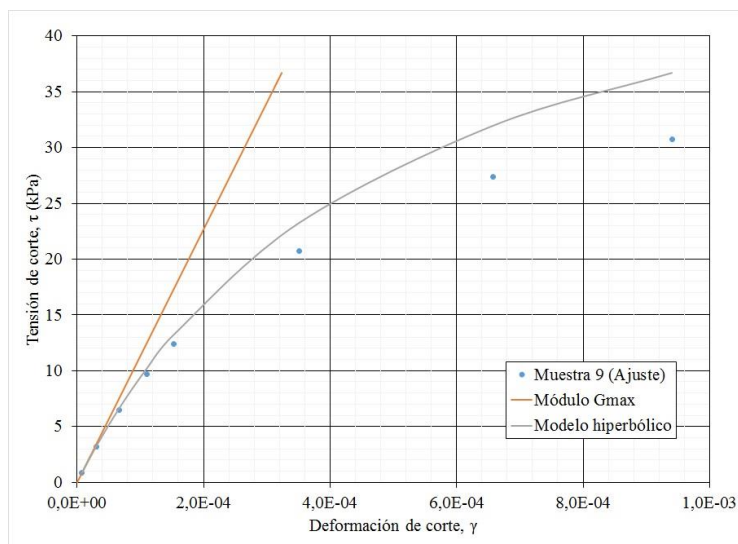
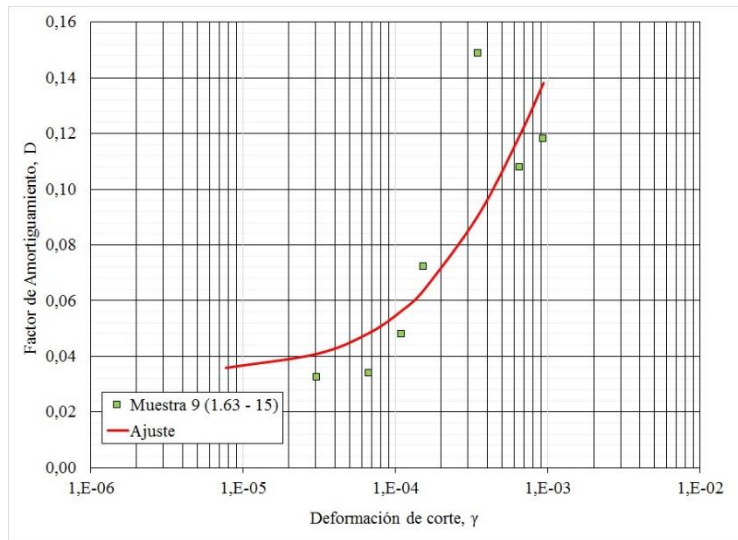
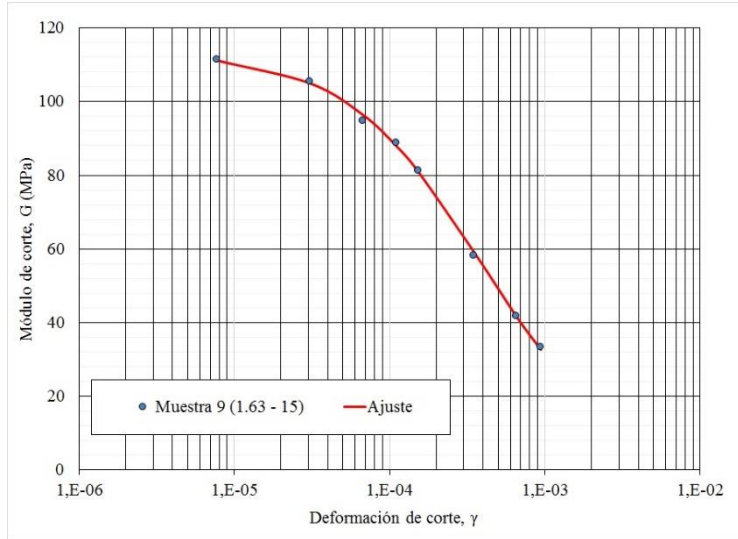
Muestra 6



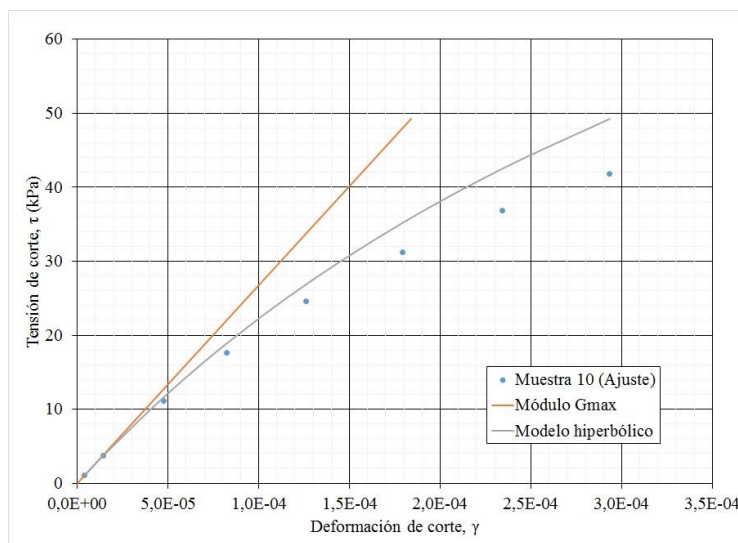
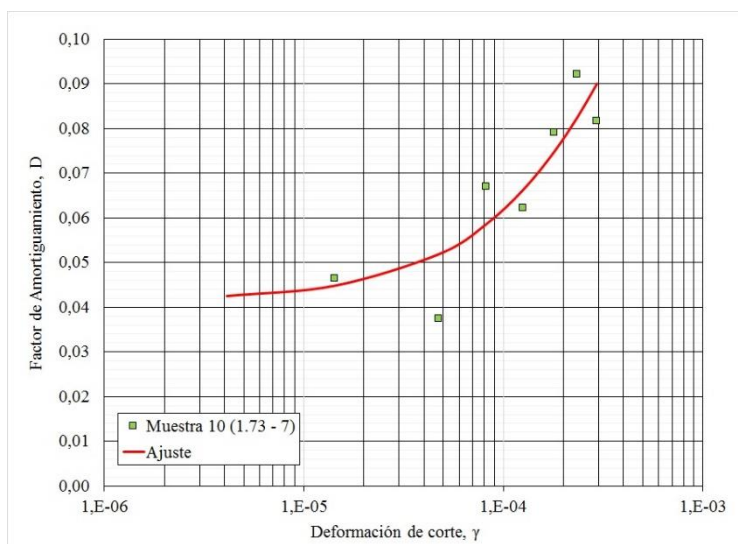
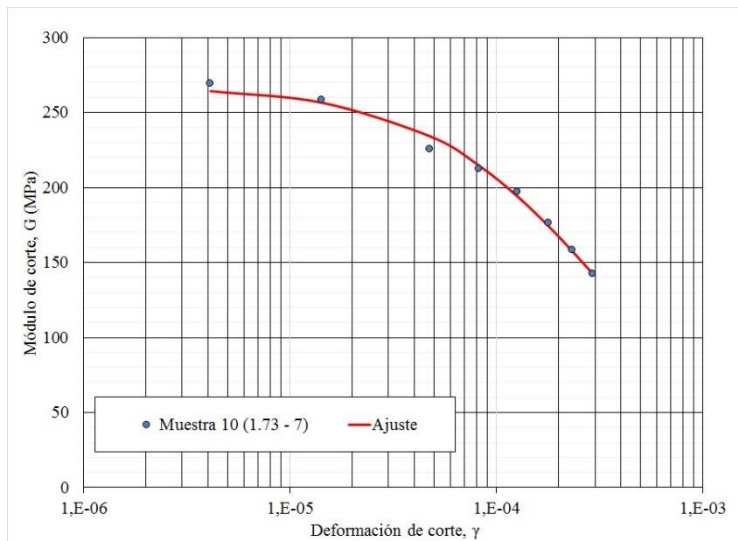
Muestra 8



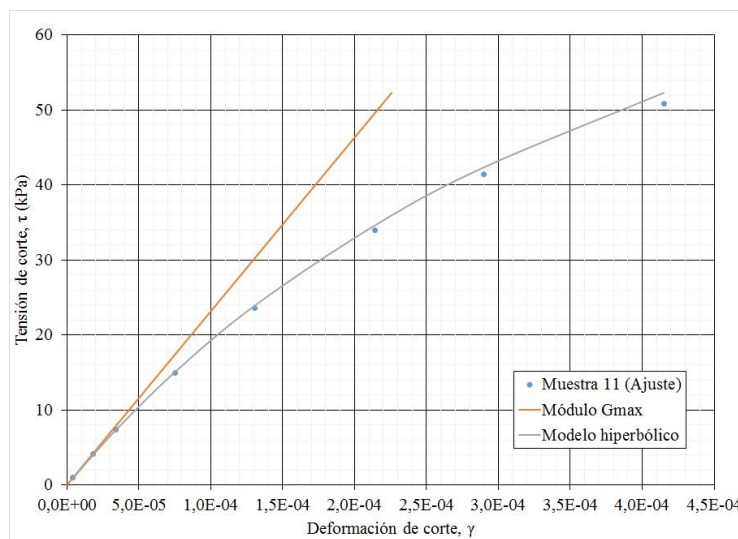
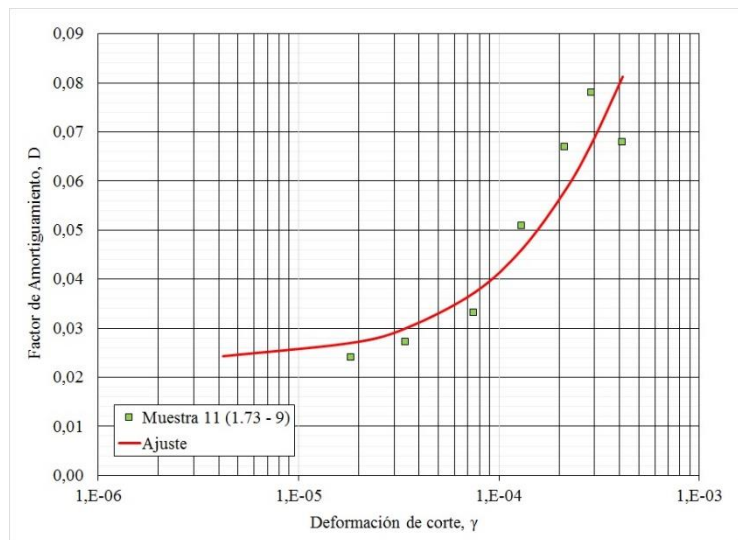
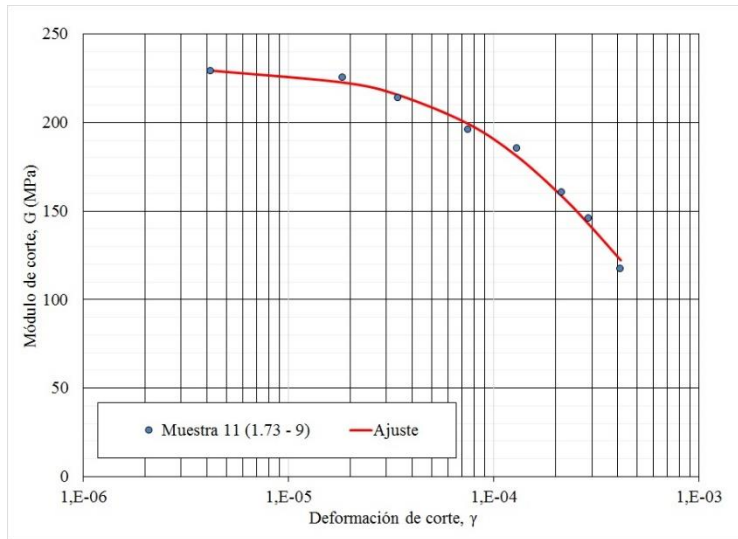
Muestra 9



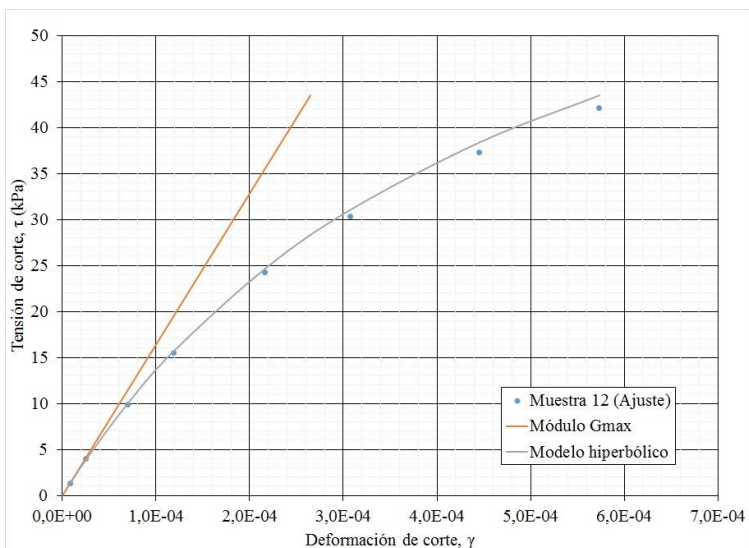
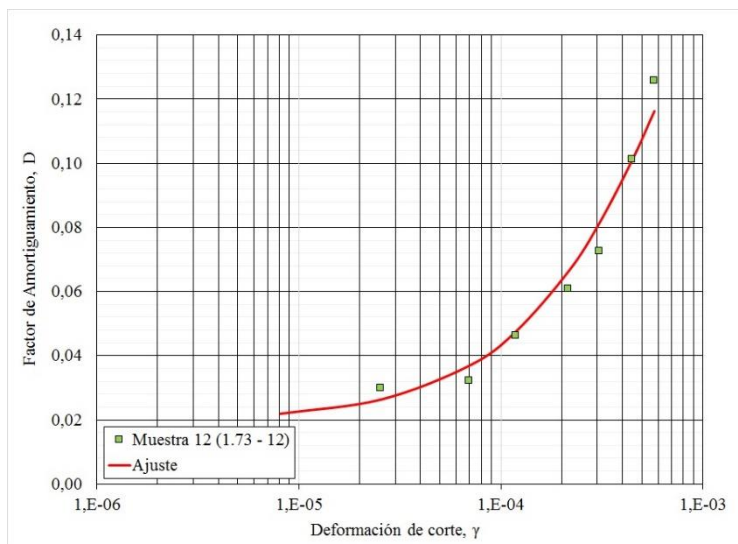
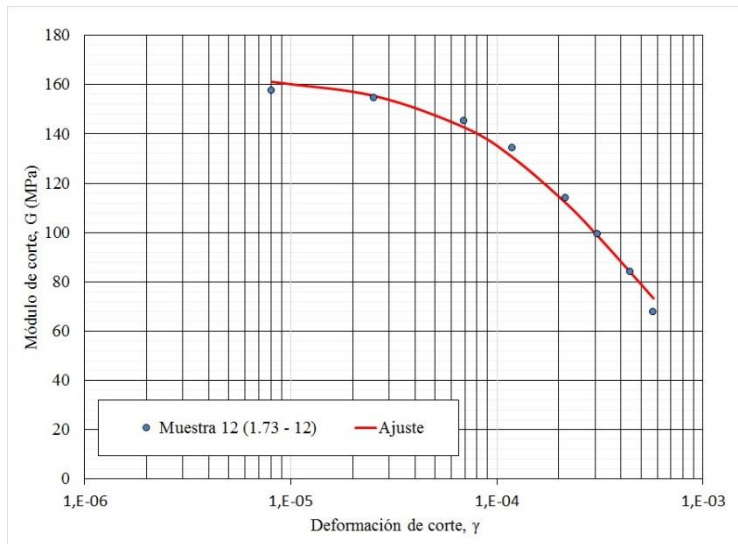
Muestra 10



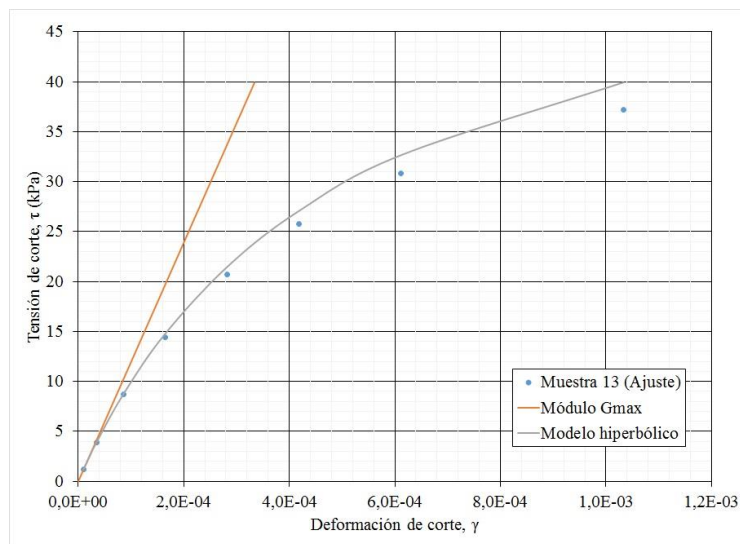
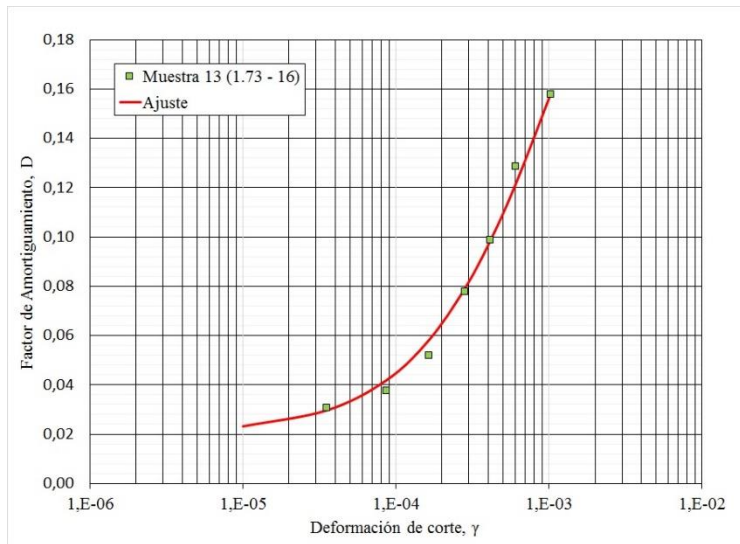
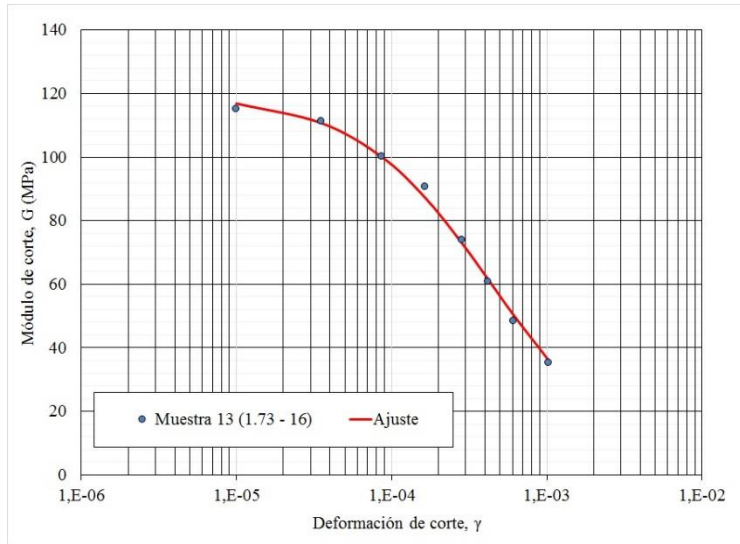
Muestra 11



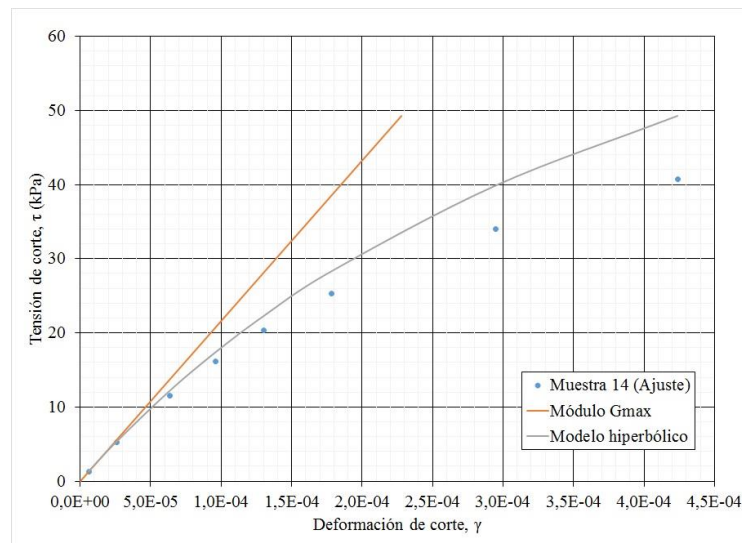
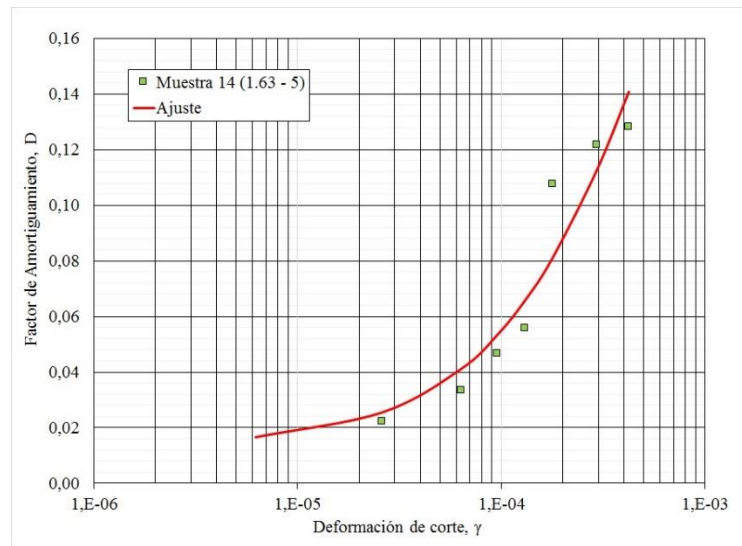
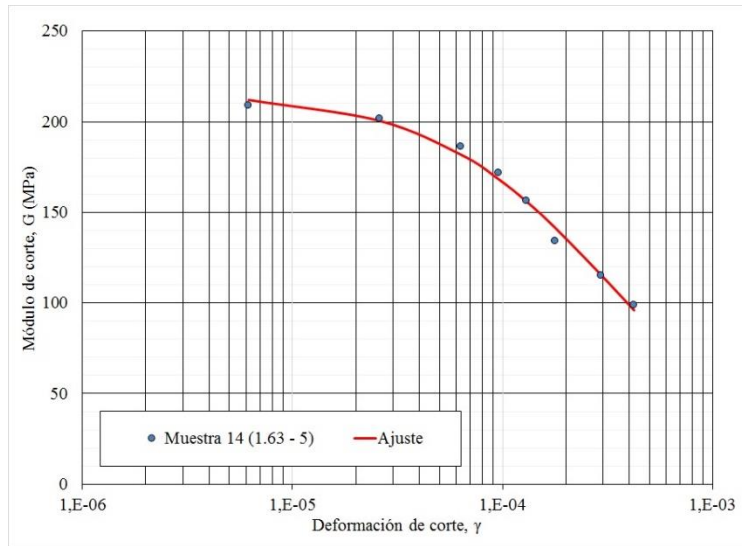
Muestra 12



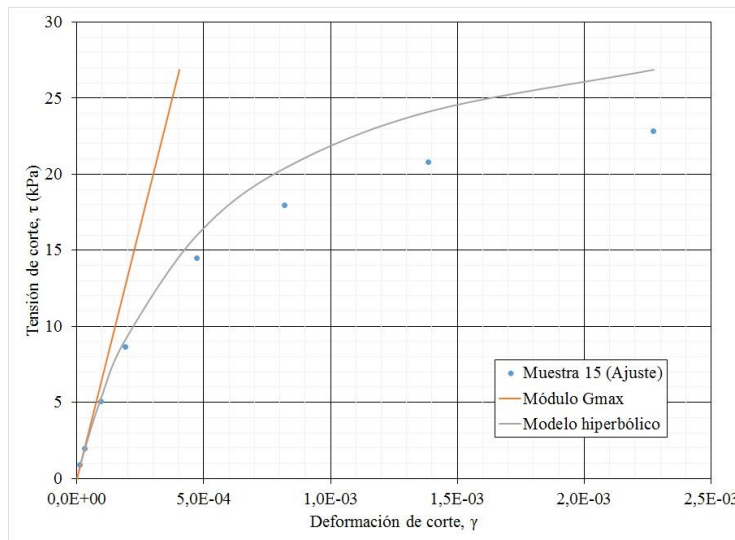
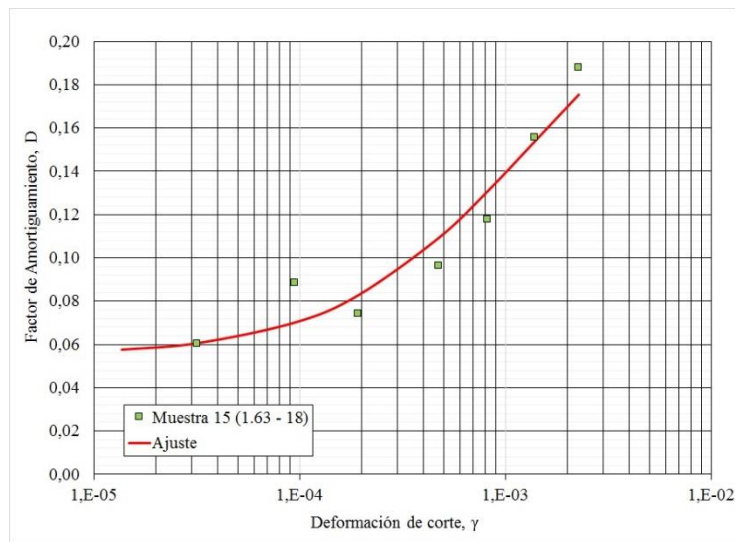
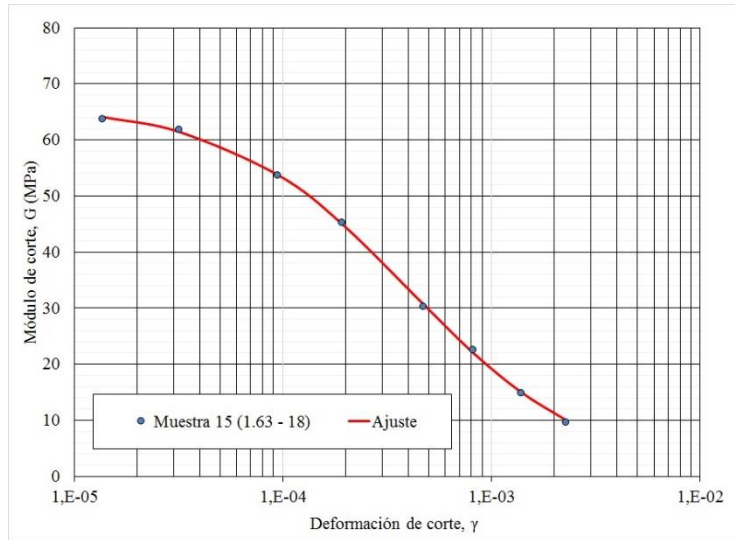
Muestra 13



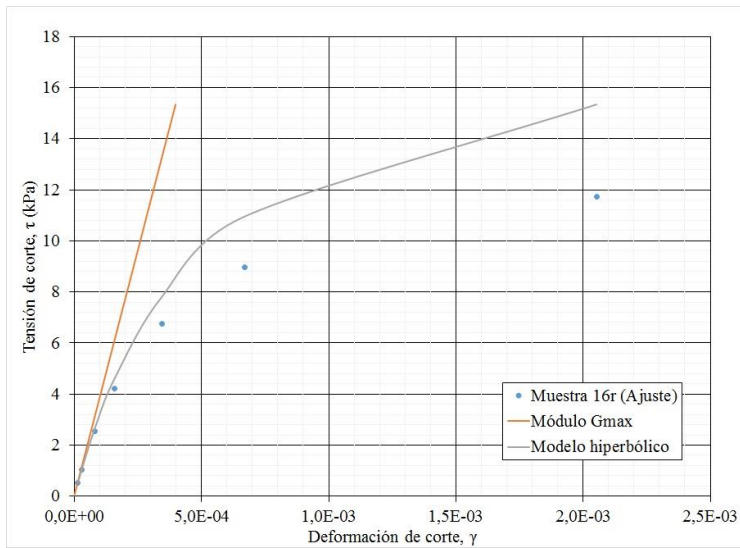
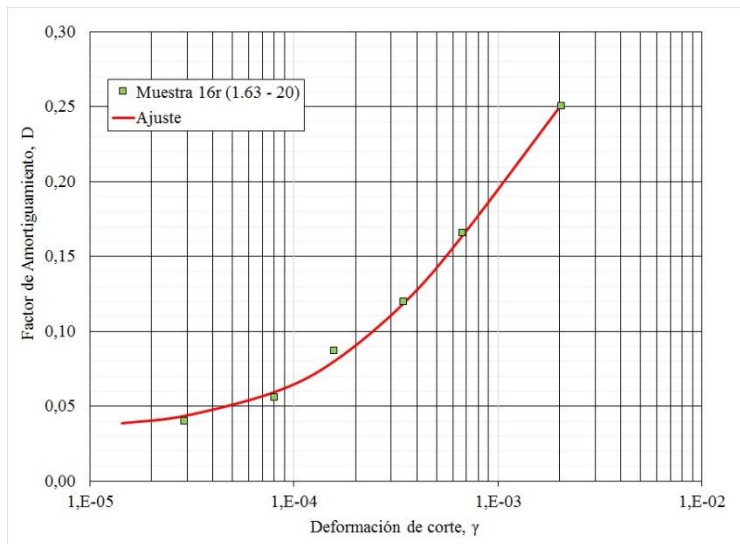
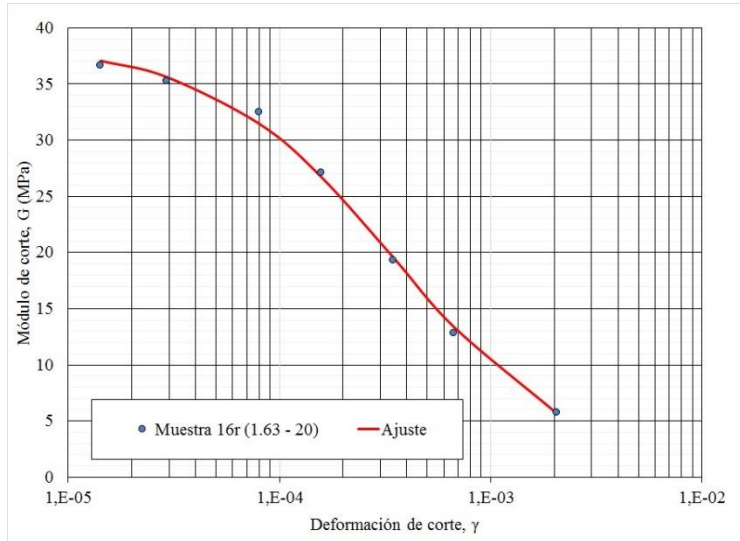
Muestra 14



Muestra 15



Muestra 16r



Muestra 17r

