

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Implementación de un Equipo Basado en Ondas Solitarias que
Permita Medir el Módulo de Young en Bajas Deformaciones**

Joel Sebastián Puebla Revelo

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 11 de mayo de 2020

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Implementación de un Equipo Basado en Ondas Solitarias que Permita
Medir el Módulo de Young en Bajas Deformaciones**

Joel Sebastián Puebla Revelo

Nombre del profesor, Título académico

Juan Pablo Villacreses, Msc.

Quito, 11 de mayo de 2020

DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Nombres y apellidos: Joel Sebastián Puebla Revelo

Código: 00130649

Cédula de identidad: 0604074856

Lugar y fecha: Quito, mayo de 2020

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

La investigación presenta la implementación de un equipo diseñado para determinar el módulo de Young del suelo a bajas deformaciones en los laboratorios de Ingeniería Civil de la Universidad San Francisco de Quito. Por medio de este equipo es posible propagar y medir ondas solitarias altamente no lineales, las cuales son inducidas a través de una cadena de partículas esféricas unidireccionales. La cadena previamente mencionada se encuentra en contacto directo con una muestra de caolín; el cual es un suelo arcilloso. Analizando la interacción entre la última partícula de la cadena y la muestra de suelo, se observa que tal interacción influye en el tiempo que le toma a la onda ser propagada y reflectada. Este tiempo denominado, tiempo de vuelo, tiene relación con las propiedades elásticas del material. Como resultado final, se espera que este equipo pueda ser considerado e implementado como una alternativa para determinar el módulo de Young de suelos blandos en la Universidad San Francisco de Quito.

Palabras clave: Métodos no destructivos, ondas solitarias altamente no lineales, propiedades elásticas, bajas deformaciones, tiempo de vuelo

ABSTRACT

The research presents the implementation of an equipment designed to determine the Young's modulus of the soil at low deformations in the Civil Engineering laboratories of the Universidad San Francisco de Quito. By means of this equipment it is possible to propagate and measure highly non-linear solitary waves, which are induced through a chain of unidirectional spherical particles. The aforementioned chain is in direct contact with a caolin sample. Analyzing the interaction between the last particle in the chain and the soil sample, it was observed how such interaction influences the time it takes for the wave to be propagated and reflected. This time called time of flight, is related to the elastic properties of the material. As a final result, it is expected that this equipment can be considered and implemented as an alternative to determine Young's modulus of soft soils at the Universidad San Francisco de Quito

Key words: Non-destructive methods, high non-linear solitary waves, elastic properties, slow deformation, time of flight.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCION	10
2	MARCO TEÓRICO	13
2.1	Contanto Hertziano	13
2.2	Ecuación de Movimiento	17
3	CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL	19
4	RESULTADOS	21
4.1	Curva de compactación de la muestra	21
4.2	TOF medidos experimentalmente	22
4.3	Módulos de Young determinados	23
5	CONCLUSIONES Y DISCUSIONES	25
6	REFERENCIAS	26

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de humedad vs. Densidad húmeda para los cuatro especímenes ensayados.....	21
Tabla 2. Comparación entre la densidad húmeda de las probetas vs. el tiempo de vuelo del mismo.	22
Tabla 3. Diferencia porcentual entre el módulo de Young medido por un contacto dinamo Hertziano y con el equipo basado en ondas solitarias.	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. (a) Contacto Hertziano, (b) superficies deformadas por una fuerza externa. Fuente: Landau & Lifshitz, 1975.....	14
Figura 2. Esquema del movimiento entre partículas de la cadena unidireccional, en donde u_i se refiere al desplazamiento de la i -ésima partícula.....	17
Figura 3. Esquema de la configuración experimental	19
Figura 4. Curva de Compactación para una energía de 12 golpes	22
Figura 5. Respuesta de la propagación de OSAN en la probeta 1.....	23

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores problemas en la ingeniería geotécnica son los terremotos, ya que estos presentan un riesgo, no solo a la vida de los involucrados, sino a la infraestructura y economía del lugar donde se origina. Por tal razón, es importante determinar las propiedades dinámicas del suelo, ya que, esto ayudaría a mitigar los efectos del mismo. Entre las principales propiedades dinámicas del suelo, encontramos el módulo de Corte (G), el módulo de Young (E) y la relación de amortiguamiento. Para medir estas propiedades existen diversas metodologías, las cuales dependen del nivel de deformación aplicada a la muestra. En el caso de ensayos a bajas deformaciones se han evaluado ensayos de pulsos ultrasónicos, ensayos de elementos piezoeléctricos de doblado y ensayos de columnas resonantes (Kramer, 1996). Para ensayos a altas deformaciones podemos encontrar los ensayos de deformación cíclica (Woods, 1978).

Los ensayos basados en propagación de pulsos ultrasónicos se los ha estudiado a lo largo de los últimos 60 años, por lo que no es algo nuevo (Wang et al. 2018). De hecho, inicialmente se analizaron las propiedades elásticas del suelo a través del método de frecuencia resonante. En tal investigación, se encontró que la resistencia del material está relacionado con el tipo de suelo, estado natural y el contenido de humedad (Lida, 1937). Por otro lado, Taylor (1948) determinó la velocidad de onda al relacionar el tiempo de vuelo de esta y la distancia recorrida. Tiempo después, se demostró que una onda fuertemente compresiva de amplitud mayor a la carga estática aplicada al sistema, debería propagarse como una onda solitaria aislada (MacKay, 1999). Cabe recalcar que este trabajo se enfoca en la propagación de las ondas solitarias mencionadas previamente, ya que se relacionan con las propiedades elásticas del suelo (Wang et al. 2018).

La propagación de ondas solitarias obedece a la ley de contacto entre partículas adyacentes, la geometría de contacto y la dimensión de las partículas (MacKay, 1999).

Dado que dentro del equipo a implementarse existe una cadena unidireccional de elementos esféricos, la interacción entre estos se traduce como una solución no lineal elástica. Esta solución no lineal es conocida como la ley de Hertz (MacKay, 1999). Considerando la posibilidad de inducir ondas solitarias, se han realizado algunos análisis. Entre estos análisis, se demostró que la formación y propagación de ondas solitarias, tienen relación directa con las propiedades elásticas del material y su geometría (Yang et al. 2011). Entre las propiedades elásticas se encuentra el módulo de Young, módulo de corte y módulo de poisson.

El objetivo principal de este trabajo es implementar un equipo basado en ondas solitarias altamente no lineales (OSAN) en la Universidad San Francisco de Quito (USFQ). Este equipo ofrece la posibilidad de medir el módulo de Young de suelos blandos a bajas deformaciones en el laboratorio de suelos de Ingeniería Civil. El suelo utilizado durante esta investigación es un caolín de baja plasticidad, la cual es compactada de acuerdo a ASTM D698. De esta arcilla se ensayan cuatro muestras con el equipo a implementarse. La ventaja de utilizar esta metodología es que las ondas solitarias, además de ser mecánicamente no dispersivas (compactas), pueden formarse y viajar por medio de sistemas no lineales (Deng et al. 2016).

Para inducir ondas solitarias altamente no lineales (OSAN) a través de un medio, se aplica un pulso sobre una cadena de partículas, tal que la amplitud de la onda, sea mayor a la fuerza estática del sistema. Para el presente trabajo se produce un impacto entre el primer elemento de la cadena, contra una esfera de las mismas características. Superpuesto a esta cadena, se encuentra un electro magneto el cual recoge y libera a la partícula que impacta contra el sistema. La cadena considera 17 elementos unidireccionales, en donde un sensor de carga dinámica (DLC 101) se encuentra en medio de este. Este sensor genera una señal de voltaje en respuesta a una fuerza dinámica

aplicada. De esta manera, podemos medir en el sensor la onda incidente y la reflejada, siendo el tiempo de vuelo (TOF) el tiempo que transcurre entre la medición de estas dos (Villacrés, 2020).

Esta investigación se divide en cuatro secciones principales. La primera fase presenta el marco teórico, en donde se encuentran todas las suposiciones detrás de la interacción entre la cadena de partículas y la muestra de suelo. También se muestra que en base a estas suposiciones, es posible modelar numéricamente el ensayo realizado con el equipo. La segunda parte del proyecto explica la configuración experimental y los ensayos realizados sobre las muestras de caolín. En esta fase se detalla la elaboración de 4 probetas compactadas, ensayadas y medidas. La fase final presenta los resultados y conclusiones, en donde estos son comparados con los valores determinados mediante ensayos de velocidades de ondas ultrasónicas.

2 MARCO TEÓRICO

En esta sección analizaremos las suposiciones detras de la propagacion de OSAN en un medio elastico. Para esto, se explica da manere breve el comportamiento de un contacto Hertziano, en donde la notación utilizada es similar al trabajo de Landau & Lifshitz (1975). En base al contacto mencionado anteriormente, se analiza la respuesta de la OSAN a través de una cadena unidireccional. En este caso, la notacion guia tiene relación con el trabajo de Deng (2016).

2.1 Contanto Hertziano

Al considerar una cadena de elementos esféricos existe una interacción entre partículas adyacentes. Los esfuerzos internos en la zona de interacción es gobernada por la ley de Hertz (Deng, 2016). Tal contacto se puede apreciar en la figura 1 (a), en donde se observa la sección transversal de dos esferas. La superficie de los dos sólidos coincide en un punto ‘O’, el cual será denominado como punto de contacto. Según Landau & Lifshitz se considera a este punto como el origen del sistema de coordenadas cartesianos (x, y, z) , (x, y, z') . De esta nomenclatura x e y se refiere al plano tangente de la superficie de cada cuerpo en contacto. Por otro lado, la variable z se mueve en dirección positivo o negativo de manera perpendicular al plano tangente de los elementos. *Landau & Lifshitz* plantean la siguiente ecuación, la cual describe la superficie de uno de los elementos.

$$z = k_{\alpha\beta}x_{\alpha}x_{\beta} \quad (1)$$

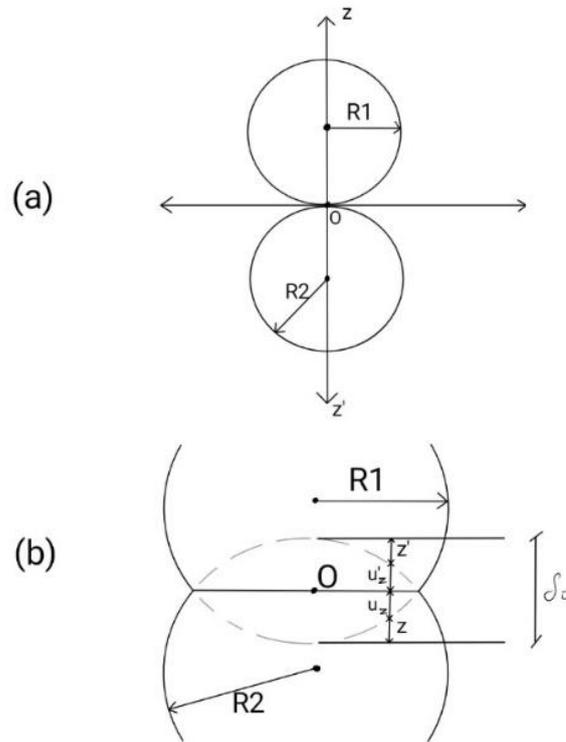


Figura 1. (a) Contacto Hertziano, (b) superficies deformadas por una fuerza externa.

Fuente: Landau & Lifshitz, 1975.

En la ecuación 1 se observan los sufijos α y β , en donde estos pueden ser expresados como $x_1 = x$ y $x_2 = y$, respectivamente. Por otro lado, la variable $k_{\alpha\beta}$ se refiere al tensor simétrico de grado 2, el cual caracteriza a la curva de la superficie de la esfera. Esta variable depende de dos parámetros principales, determinados como $\frac{1}{R_1}$ y $\frac{1}{R_2}$. Tales parámetros (R_1 y R_2) se traducen como el radio de curvatura de ambos elementos en el punto de contacto (Landau & Lifshitz, 1975).

Observando la figura 1 (b) se puede decir que al encontrarse los sólidos bajo una carga, estos sufren una presión de contacto entre ellos. Tal presión conlleva a que exista una pequeña longitud de aproximación (δ) entre los centros de los elementos. Como consecuencia, existe una pequeña deformación (u_z) de los centros de los elementos, respecto a un sistema de referencia. Por ende, existe una porción de contacto finito entre

las superficies. Como resultado de este análisis, la interacción entre las dos superficies puede ser expresada como una función de la longitud de aproximación de los centros de los elementos.

$$\delta = (k_{\alpha\beta} + k'_{\alpha\beta})x_{\alpha}x_{\beta} + u_z + u'_z \quad (2)$$

Esta interacción que se encuentra planteada en la ecuación 2, fue resuelta en primer lugar por H. Hertz (Landau & Lifshitz, 1975). Quien concluyó que el área de contacto depende del radio relativo (R) y la fuerza de contacto (F) generada por las sollicitaciones externas al sistema. Cabe recalcar que la geometría del contacto es circular, el cual se encuentra expresado en la ecuación 3. Según Landau & Lifshitz (1975) se define a la longitud de aproximación entre los elementos, como la razón entre el cuadrado del radio de contacto (a) y el radio equivalente (ecuación 4). Dado que el área de contacto depende de F, la distancia de aproximación también. De esta manera al despejar F, encontramos la fuerza en la interacción entre dos partículas esféricas en función de su longitud de aproximación (δ) (ecuación 5).

$$a = \left(\frac{3FR}{4R^*}\right)^{1/3} \quad (3)$$

$$\delta = \frac{a^2}{R} = \left(\frac{9F^2}{16RE^{*2}}\right)^{1/3} \quad (4)$$

$$F = \frac{4\sqrt{R} * E^*}{3} \delta^{3/2} \quad (5)$$

De la ecuación 5 definimos al radio efectivo (R), como $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)^{-1}$. Por otro lado el valor de E* se refiere al módulo de Young efectivo de los elementos en contacto. Para

el caso de la figura 1 el módulo mencionado previamente es igual a $\left(\frac{(1-v_1^2)}{E_1} + \frac{(1-v_2^2)}{E_2}\right)^{-1}$.

Segun Hertz, la fuerza que existe entre dos elementos esfericos adyacentes es igual a $3/2$ de la longitud de aproximacion entre los centros de cada partical (δ) (Johnson, 1985). De esta manera, la ecuacion 6 es una simplificacion de la 5, en base a la conclusion mencionada previamente.

$$F = A\delta^{3/2} \quad (6)$$

Observando la ecuación 6, A se refiere a la rigidez de contacto entre las dos partículas esféricas adyacentes (Ni et al. 2013), el cual depende de la geometría de contacto y de las constantes elásticas de los dos cuerpos (Johnson, 1985). Dado que en nuestro modelo existen dos interacciones diferentes, deberán existir dos rigideces de contacto. Una de ellas será la interacción entre partículas esféricas (A_c) y la otra será la interacción entre una esfera y una superficie plana (A_w). En la en la ecuación 6, se observa que la interacción se refiere a dos esferas de diferente material y dimensiones. Por lo que esta expresión puede simplificarse para nuestro caso, dado que el contacto entre esferas es del mismo material y dimensiones. Por otro lado, para el contacto entre una esfera y una superficie plana, se asume que el radio de la superficie plana (R_2) es infinito. Por tal razón, el radio efectivo depende únicamente del radio la esfera. El resultado de tales simplificaciones para las rigideces de contacto se presenta en la siguiente ecuación (Villacrés, 2020).

$$\begin{cases} A_c = \frac{2E\sqrt{R/2}}{3(1-v^2)} \\ A_w = \frac{4\sqrt{R}}{3} \left(\frac{1-v^2}{E} + \frac{1-v_w^2}{E_w} \right)^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 Ecuación de Movimiento

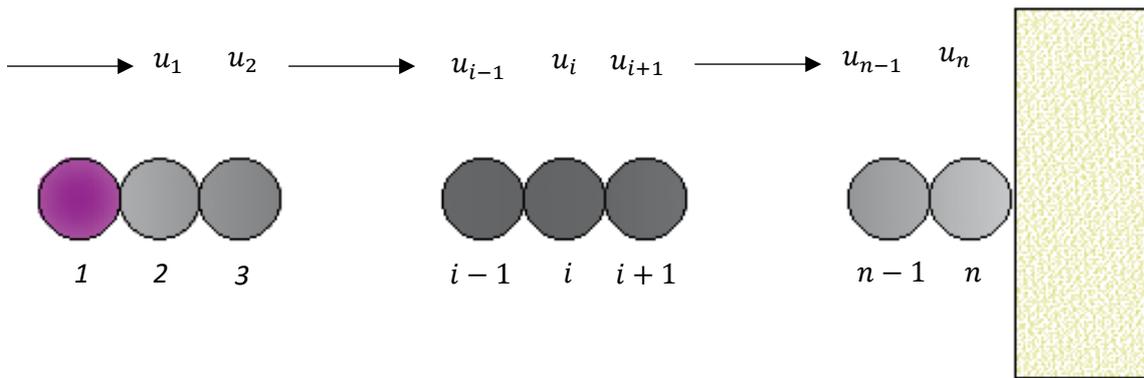


Figura 2. Esquema del movimiento entre partículas de la cadena unidireccional, en donde u_i se refiere al desplazamiento de la i -ésima partícula.

Debido a las fuerzas inerciales existentes en el sistema, se generarán movimientos entre las partículas de la cadena. Analizando la figura 2, cabe recalcar que la línea de acción de fuerza de la gravedad, coincide con la dirección de desplazamientos (u_i). Ahora, se analizará el movimiento de la partícula i , partiendo de la segunda ley de Newton. En donde la fuerza inercial total de la esfera a analizar depende de tres fuerzas actuantes. Tales cargas en la esfera son: el peso propio y la fuerza de contacto entre la partícula de la derecha e izquierda. De la figura 2, u_i se refiere a la posición del centro de la esfera i respecto a un sistema de referencia. Del mismo modo que u_{i-1} , por lo que la diferencia entre las posiciones de los centros de las esferas, resulta en la longitud de aproximación entre los centros de estos (δ). Partiendo de la ecuación 6 y considerando la rigidez de contacto entre las esferas i e $i-1$, se determina la primera fuerza de contacto. De la misma manera se determina la fuerza de contacto entre la esfera i e $i+1$. Como resultado de estas fuerzas actuantes, encontramos la fuerza inercial resultante de la esfera i . Esta expresión se la observa en la ecuación 8, que al ser una ecuación diferencial, se la resuelve por el método de cuarto orden de Runge-Kutta. Previo a resolver el sistema fue necesario considerar las siguientes condiciones iniciales. Los desplazamientos de los i -

ésimos elementos $i = 0, 1, \dots, n$, serán igual a $u_i = 0$, al igual los valores de \dot{u}_i . Sin embargo, la velocidad inicial $\dot{u}_0 = \sqrt{2gh}$, en donde h se refiere a la altura específica a la que la partícula de choque cae y g se refiere a la magnitud de la gravedad.

$$m\delta_{tt}^2 u_i = A_{i-1}(u_{i-1} - u_i)^{3/2} - A_i(u_i - u_{i+1})^{3/2} + F_i \quad (8)$$

La solución del sistema me permite modelar numéricamente la propagación de la OSAN a través de la cadena y su reflexión. Dado que en medio de la cadena se encuentra un sensor, la solución de la ecuación 8 para este punto es la que me interesa. Por el hecho de que puedo comparar los resultados del modelo numérico, con las lecturas reales del sensor. Por otro lado, lo que yo encuentro con las medidas del sensor, son los valores de *TOF*. Tales valores se encuentran relacionados con los parámetros elásticos de la muestra (Villacrés, 2020). Por tal razón, el modelo numérico me permitirá relacionar los *TOF*, a diferentes módulos de Young y módulos de Poisson. De esta manera cuando se midan *TOFs* experimentalmente, se podrán elucubrar los módulos de Young respectivos. La simulación numérica se la realizó para módulos de Young entre 10 MPa y $2 \times 10^3 \text{ MPa}$ con un rango de módulos de Poisson entre 0.1 y 0.5. (Villacrés, 2020).

3 CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

El equipo que será implementado consiste de una cadena unidireccional de 16 esferas metálicas. En medio de la cadena se encuentra un sensor de carga dinámica Omega DLC – 101. Este sensor permite detectar y medir las ondas solitarias que se inducen en el sistema y su reflexión. Adicional a estos elementos se encuentra la esfera de impacto encima de la cadena, la cual se mantiene a una altura controlada de 8 mm respecto a la primera partícula. Las esferas de la cadena tienen un diámetro igual a 19.05 mm, al igual que la esfera de impacto. La onda se genera al momento en el que la esfera de impacto choca contra la primera esfera de la cadena. La señal es transmitida a un amplificador de señal, para luego ser observada en un osciloscopio. En la figura 3 se muestra un esquema del equipo.

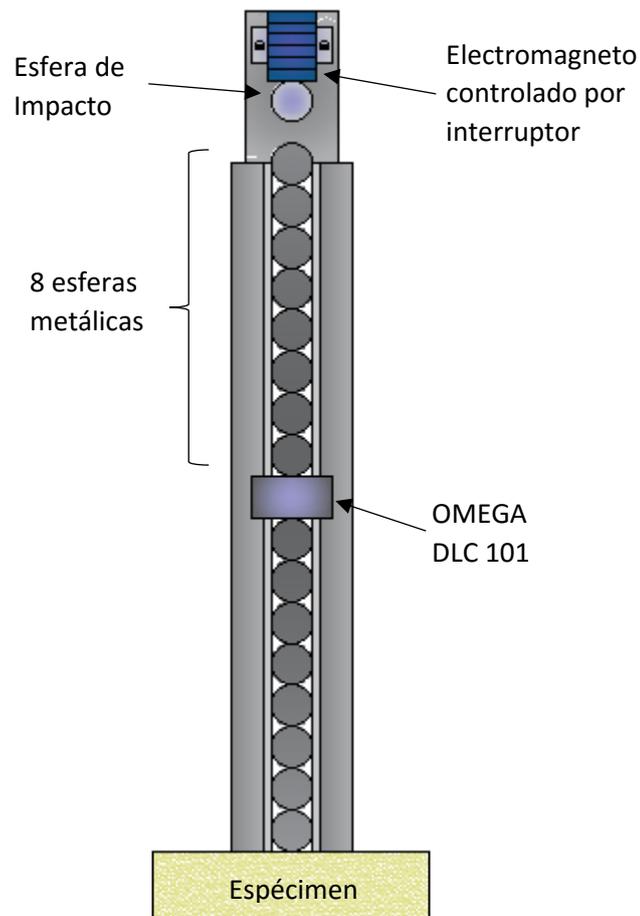


Figura 3. Esquema de la configuración experimental

Una vez calibrado el equipo se moldearon cuatro probetas del material de estudio; que, para el presente trabajo se utilizó Caolín. Esta arcilla posee un 35% de límite líquido, un 17.9% de índice plástico y una gravedad específica de 2.68. Las probetas fueron construidas teniendo en cuenta diferentes propiedades volumétricas. A estas muestras se les adiciono la cantidad respectiva de agua y posteriormente, fueron disgregadas en un tamiz No. 8. Tales muestras fueron guardadas en bolsas herméticas y se las dejaron reposar por 24 hr. De esta manera se consiguió que se uniformice el contenido de humedad. Como resultado, los especímenes moldeados alcanzaron densidades entre 1.53 y 1.59 g/cm³ al ser compactados a 12 golpes, acorde con ASTM D698.

Cada una de las probetas fueron desmoldadas utilizando un equipo hidráulico. Posterior a esto, se colocó el equipo basado en ondas solitarias en el centro superior de la muestra y se ensayó cinco veces a cada probeta. El módulo de Young fue determinado utilizando los valores medidos de TOF y curvas que relacionan a este con el módulo de Young (Villacrés 2020). Para corroborar los resultados experimentales, se ensayaron a los mismos cilindros propagando ondas a través de un contacto dinámico Hertziano en la muestra. En resumen se golpeó el centro superior de la muestra con una esfera metálica, produciendo ondas de cuerpo. Utilizando un acelerómetro, el cual es colocado a 5 mm del punto de impacto, se registra la onda incidente. A su vez, utilizando transductores de ondas principales y secundarias, se mide el tiempo de llegada de las ondas. De esta manera se determina el tiempo que le toma a las ondas de cuerpo propagarse de extremo a extremo. A este tiempo en relación con la altura del cilindro, nos da como resultado las velocidades de las ondas. Por medio de las velocidades de onda p y s, se determina el módulo de Young y corte respectivamente.

4 RESULTADOS

Los resultados del equipo que se sugiere implementar en el laboratorio de suelos de la USFQ, se muestran en esta sección. Tales resultados se presentan en cuatro partes. En primer lugar se muestran los resultados de las probetas que fueron compactadas en base a ASTM D698. En esta parte se muestra la curva de compactación para una energía de 12 golpes. En la segunda sección, se pueden observar los registros medidos por el sensor Omega DL – 101 de OSAN. En este punto, se presenta la señal medida por el sensor de una de las probetas ensayadas. En tercer lugar, se presenta una comparación entre los valores de TOF y la densidad húmeda de las muestras. Los resultados se presentan en términos de la densidad húmeda, ya en esta condición se ensayaron a los especímenes. Finalmente se puede apreciar una comparación entre los resultados obtenidos experimentalmente con el equipo basado en ondas solitarias y los determinados por medio de un contacto Hertziano.

4.1 Curva de compactación de la muestra

En base a la normativa ASTM D698 se compararon cuatro muestras de caolín a contenidos de humedades de 21.1%, 21.7%, 22.7% y 24%. La compactación se realizó a una energía de 600 KN/m².

Tabla 1. Contenido de humedad vs. Densidad húmeda para los cuatro especímenes ensayados

<i># Probeta</i>	<i>w (%)</i>	<i>ρ_{seca} (g/cm³)</i>
1	21.1	1.529
2	21.7	1.552
3	22.7	1.586
4	24.0	1.556

En la tabla 1 se puede observar que la densidad del material empieza a incrementarse a medida que el contenido de humedad lo hace. Sin embargo, llega a un

punto en donde esta empieza a disminuir. Por lo que se presume que el punto de inflexión de la curva se encuentra entre el 22 y 23 por ciento del contenido de humedad. De la figura 4 se observa que la arcilla analizada posee un contenido de humedad óptimo igual a 22.7. La densidad máxima correspondiente a esta condición es igual a 1.586 g/cm³.

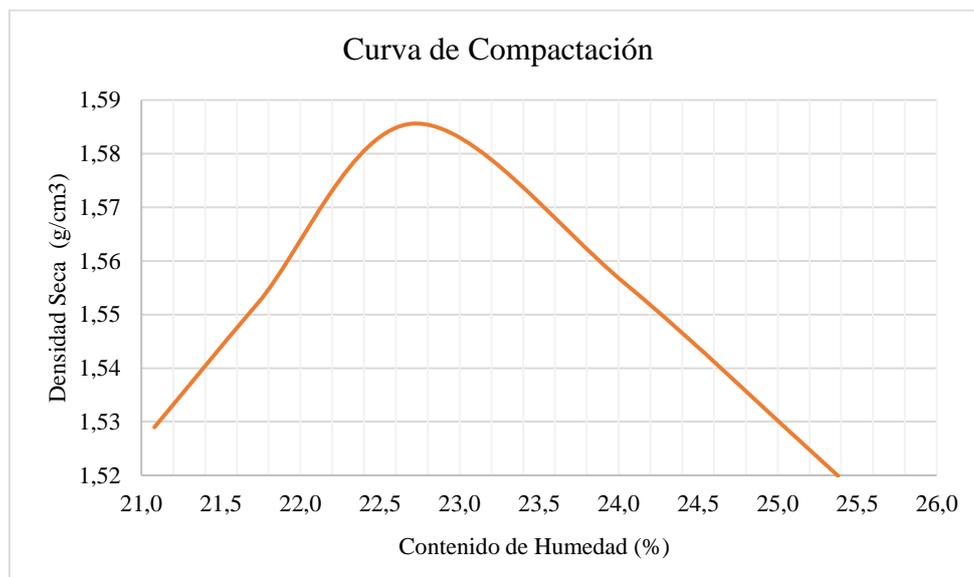


Figura 4. Curva de Compactación para una energía de 12 golpes

4.2 TOF medidos experimentalmente

En esta sección se realiza una comparación entre la densidad húmeda de cada muestra, con su respectivo valor de *TOF* medidos con el equipo basado en ondas solitarias.

Tabla 2. Comparación entre la densidad húmeda de las probetas vs. el tiempo de vuelo del mismo.

# Probeta	$\rho_{húmeda}$ (g/cm ³)	<i>TOF</i> (s)
1	1.851	1.414E-03
2	1.890	1.392E-03
3	1.952	1.780E-03
4	1.930	1.793E-03

En base al comportamiento de la onda a través del medio, se observa que a medida el espécimen aumenta su densidad, la onda se induce y refleja más rápido por el medio. Por tal razón, el tiempo de vuelo decrece a medida que la densidad incrementa. Por otro lado, a medida que la densidad de la muestra llega a su valor máximo, el valor de *TOF* incrementa. La fuente de este comportamiento se encuentra relacionado con las propiedades del medio por el que viaja la onda (Yang et al. 2011). Esto sucede ya que al variar el contenido de humedad de la muestra, cambian las propiedades del material.

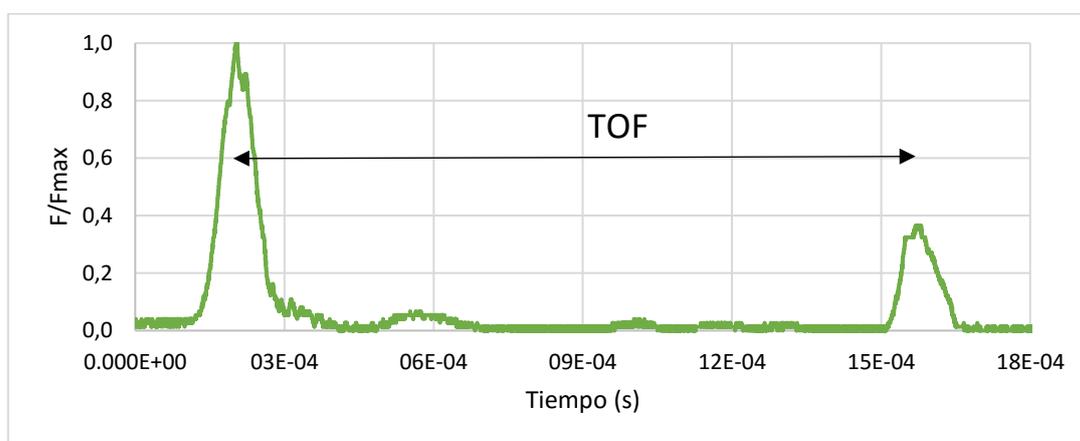


Figura 5. Respuesta de la propagación de OSAN en la probeta 1.

4.3 Módulos de Young determinados

Considerando la simulación numérica realizada, se obtuvo una relación entre los módulos de Young para diferentes *TOF*. Por tal razón, al haber obtenido los *TOF* para los especímenes ensayados, se determinaron módulos de Young correspondientes, presentados en la tabla 3. Para evaluar el desempeño del equipo se presentan los valores de módulo de Young, para probetas de las mismas características a las utilizadas con el equipo basado en OSAN, pero por medio del ensayo de ondas ultrasónicas. Como resultado se encontró una diferencia porcentual máxima del 36%. La fuente de esta diferencia radica en que el momento en el que se genera el pulso, la última partícula de la cadena deforma plásticamente la superficie del espécimen (Villacrés, 2020).

Tabla 3. Diferencia porcentual entre el módulo de Young medido por un contacto dinámico Hertziano y con el equipo basado en ondas solitarias.

# Probeta	<i>E (Pa) HC*</i>	<i>E (Pa) SW*</i>	<i>Diferencia (%)</i>
1	2.83E+08	1.80E+08	36%
2	2.88E+08	1.98E+08	31%
3	9.68E+07	6.31E+07	35%
4	4.58E+07	5.50E+07	20%

**HC se refiere a que el resultado fue obtenido por medio de contacto Hertziano*

**SW se refiere a que el resultado fue obtenido por medio de la propagación de OSAN*

5 CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

Este trabajo tiene como objetivo implementar un equipo basado en ondas solitarias en la USFQ, para esto se ha evaluado su desempeño en suelos blandos. En base a los resultados de los ensayos realizados, el modelo numérico logra medir módulos de Young aproximados para TOFs experimentales. Por tal razón, se sugiere que este sistema podría ser utilizado como una alternativa para determinar el módulo de Young en suelos blandos a bajas deformaciones, en el laboratorio de suelos de la USFQ.

Debido a que el TOF depende del módulo de Young del material y por ende de la densidad de la misma, se concluye que el tiempo de vuelo disminuye, mientras la densidad del suelo incrementa hasta un valor antes de su máximo. Por otro lado, desde que se alcanza el contenido de humedad óptimo en adelante, el TOF incrementa y la densidad disminuye. Sin embargo existen fuentes de error debido a la plastificación de la muestra en el punto de contacto. Por esto, se puede concluir que al considerar estos efectos en las muestras de suelo, se recomienda mejorar el equipo para mejores resultados. Aunque, se sugiere que el equipo puede ser utilizado como una alternativa para medir el módulo de Young en suelos blandos dentro la USFQ. Incluso, podría ser utilizado como un equipo de control para la compactación de suelos en campo.

6 REFERENCIAS

- ASTM D698 - 12e2 *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort* (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))
- Cai, L., Yang, J., Rizzo, P., Ni, X., & Daraio, C. (2013). *Propagation of highly nonlinear solitary waves in a curved granular chain*. *Granular Matter*, 15(3), 357–366. doi:10.1007/s10035-013-0414-z
- Deng, W., Nasrollahi, A., Rizzo, P. & Li, K. (2016). *On the Reliability of a Solitary Wave Based Transducer to Determine the Characteristics of Some Materials*. *Sensors*. 16. 5. 10.3390/s16010005.
- Johnson, K. (1985). *Contact Mechanics*. Dynamic Effects and impact. Contact resonance. Great Britain, Cambridge University Press.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Measurement of Dynamic Soil Properties. Laboratory Test. New Jersey, United States of America: Prentice – Hall, Inc.
- Landau, L. and Lifshitz, E. (1986). *Theory of Elasticity*. Pergamon, Oxford.
- Lida, K. (1937). The velocity of elastic waves in sand. *Bulletin of Earthquake Research Institute* 4, 828–829.
- MacKay, R. (1999). *Solitary waves in a chain of beads under Hertz contact*. *Physics Letters A*, 251(3), 191–192. doi:10.1016/s0375-9601(98)00867-6
- Ni, X., Cai, L., & Rizzo, P. (2013). *A Comparative Study on Three Different Transducers for the Measurement of Nonlinear Solitary Waves*. *Sensors*, 13(1), 1231–1246. doi:10.3390/s13010123
- Shankar, S., Murali, A. & Dey, A. *Parameters Influencing Dynamic Soil Properties: A Review Treatise*. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. vol. 3, pp. 47 – 49.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of soil mechanics*. New York, NY: Wiley.
- Villacréses, J. (2020). *Non-destructive measurement of Young's modulus of rocks and compacted materials based on non-linear solitary waves*. *Transportation Geotechnics*. Submitted
- Wang, Y., Li, X. & Zheng, B. (2018). *Experimental study on mechanical properties of clay soil under compression by ultrasonic test*. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 22:6, 666-685, DOI: 10.1080/19648189.2016.1217791
- Woods, R D. (1978). *Measurement of Dynamic Soil Properties*. From Volume I of *Earthquake Engineering and Soil Dynamics--Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference*, June 19-21, 1978,

Pasadena, California. Sponsored by Geotechnical Engineering Division of ASCE in cooperation with: American Society of Civil Engineers, p. 91-178
<https://trid.trb.org/view/74544>

Yang, J., Silvestro, C., Khatri, D., De Nardo, L., & Daraio, C. (2011). *Interaction of highly nonlinear solitary waves with linear elastic media*. *Physical Review E*, 83(4), 46606.