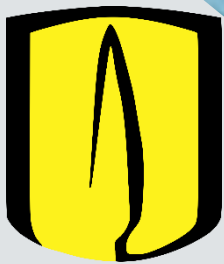


COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE UN PUENTE DE AGUA ENTRE DOS ESFERAS



**Universidad de los Andes
Departamento de Ingeniería Civil
y Ambiental
Rodrigo León Jaimes Madrid
Miguel Angel Cabrera Cabrera
2021**

Contenido

Tabla de Figuras.....	3
Tabla de Anexos	3
Introducción	4
Metodología	7
Materiales.....	7
Montaje experimental	7
Ensayos	9
Primera campaña de ensayos	9
Resultados.....	9
Discusión	11
Segunda campaña de ensayos.....	11
Resultados.....	12
Discusión	13
Tercera campaña de ensayos.....	13
Resultados.....	13
Discusión	14
Cuarta campaña de ensayos	14
Resultados.....	15
Discusión	15
Conclusión	16
Referencias.....	17
Anexos	18

Tabla de Figuras

Figura 1. Licuación del suelo durante el terremoto de Niigata, Japón en 1964.....	4
Figura 2. Puente de agua creado experimentalmente.	5
Figura 3. Prensa Gilson con esferas posicionadas correctamente y panel LED a contraluz.	8
Figura 4. Gráfica Delta distancia vs Distancia inicial.	9
Figura 5. Gráfica Distancia inicial vs Distancia final.	10
Figura 6. Gráfica Delta distancia vs Distancia inicial distinguiendo velocidades.....	10
Figura 7. Gráfica Distancia inicial vs Distancia final distinguiendo velocidades.	11
Figura 8. Gráfica Distancia inicial vs Volumen de agua.	12
Figura 9. Gráfica Delta distancia vs Volumen de agua.	12
Figura 10. Diagrama de fase análisis de ruptura de puente de agua con varianza de Frecuencia y amplitud.	14
Figura 11. Diagrama de fase de ruptura de puente de agua con varianza de Distancia entre las esferas y Frecuencia.....	15

Tabla de Anexos

Anexo 1. Etiqueta física de referencias de las esferas.	18
Anexo 2. Celda de carga.	18
Anexo 3. Prensa Gilson.	18
Anexo 4. Generador de potencias.	19
Anexo 5. Generador de funciones.....	19
Anexo 6. Sensor de deformación.	19
Anexo 7. Visualizador de funciones.	20
Anexo 8. Montaje experimental.....	20
Anexo 9. Balanza de precisión.	20
Anexo 10. Pipeta de precisión.	21
Anexo 11. Bitácora de trabajo para el primer ensayo.....	21
Anexo 12. Bitácora de trabajo para el segundo ensayo.	22
Anexo 13. Bitácora de trabajo para el tercer ensayo.	24
Anexo 14. Bitácora de trabajo para el cuarto ensayo.	25
Anexo 15. Código de Python para el desarrollo de las gráficas.	30
Anexo 16. Código de nuevo diagrama de fase de Amplitud vs Frecuencia.	31

Enlace para ingresar a una carpeta compartida con todos los resultados obtenidos y la evidencia fotográfica:

https://uniandes-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/rl_jaimes_uniandes_edu_co/EhAV4QBi8oBBjSImDvWlXZABG5bRNtbjkbNc_qyyWZ5Vjg?e=vmfWni

Introducción

Los suelos granulares son suelos que están conformados por partículas gruesas, de tamaño similar al de la arena o al tamaño de la grava. Estos suelos también son conocidos como suelos no cohesivos, debido a que no tienden a presentar una atracción entre las partículas y sus partículas son relativamente grandes. Los suelos granulares se densifican cuando están sometidos a carga cíclica o monotónica, siempre y cuando sean suelos sueltos (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2010). En un suelo que no presenta cohesión la propagación de ondas sísmicas genera una densificación adicional de las partículas de suelo. Con esto, se incrementa de forma notoria los efectos de corte sentidos por dicha masa de suelo (Armouti, 2015).

En geotecnia el concepto de esfuerzo efectivo resulta sumamente importante. El esfuerzo efectivo es el esfuerzo aplicado menos el soporte de la presión del fluido intersticial. La licuación ocurre cuando el esfuerzo efectivo es cero. El esfuerzo efectivo es cero cuando las partículas de suelo no se encuentran conectadas. Por eso, la importancia de estudiar los suelos granulares por no presentar unión entre sus partículas y facilitar el fenómeno de la licuación.

La licuación en los suelos genera daños de importancia. La capacidad de daños que presenta el fenómeno de la licuación es de mayor preocupación que la acción directa de las ondas sísmicas sobre la infraestructura. La licuación también puede movilizar, sumergir o hasta volcar las edificaciones; por lo que el daño de este contratiempo es enorme, no tanto en daños materiales, sino por el riesgo en pérdidas humanas. Un ejemplo de lo mencionado con anterioridad se observa en los grandes terremotos que afectan la isla de Japón, en los que sus principales perjuicios son causados por licuación (Kramer, 1996).



Figura 1. Licuación del suelo durante el terremoto de Niigata, Japón en 1964.

Adicionalmente, un puente de agua es una conexión líquida entre partículas sólidas o partículas de suelo. Conduce a varios fenómenos observados en materiales granulares parcialmente saturados, en particular la fuerza capilar entre partículas. Esta fuerza contribuye a la deformación y flujo de componentes granulares y tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas y físicas de estos componentes. El conocimiento del comportamiento del fluido presente entre los granos a escala de las partículas, en diferentes condiciones, es indispensable en la descripción completa de los fenómenos apreciados en materiales granulares húmedos y en la modelización de dichos materiales (Mielniczuk, Millet, Gagneux, & El-Yousoufi, 2017).

Entender las características físicas de las conexiones líquidas entre partículas es de suma importancia para comprender de una mejor forma el fenómeno de la licuación en suelos parcialmente saturados. Al llegar las ondas sísmicas a los suelos saturados ocasionan una densificación del material granular lo que genera el ascenso del agua y transforma el estado del suelo superficial de sólido saturado a un estado líquido. Cuando el suelo está parcialmente saturado y el drenaje es lento o inexistente, esta tendencia a la densificación causa el crecimiento de la presión de poros, en exceso de su estado estático, y el decrecimiento correlativo del esfuerzo efectivo hasta que sobreviene la flotación de las partículas, lo que ha recibido el nombre genérico de licuación. Por lo tanto, entender las frecuencias y amplitudes que generan el rompimiento de las conexiones y desencadenan un ascenso del agua gracias a la densificación, resulta fundamental para crear soluciones a los daños a la estabilidad de los suelos como hundimientos y volcamientos que genera la licuación, perjudicando directamente a las edificaciones y demás estructuras (ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA, 2010).

En el caso de un suelo parcialmente saturado, los puentes de agua que se crean entre los granos de suelo aumentan el esfuerzo efectivo, conectando las partículas de suelo. La licuación de suelos es la alteración de un suelo sólido saturado a uno en estado líquido como consecuencia del aumento de la presión que proporciona el agua localizada en los poros del suelo. Además de ocurrir cuando se rompen los puentes de agua, lo que genera que las partículas de suelos pierdan su conexión y el esfuerzo efectivo equivalga a cero (Seed & Idriss, 1971).

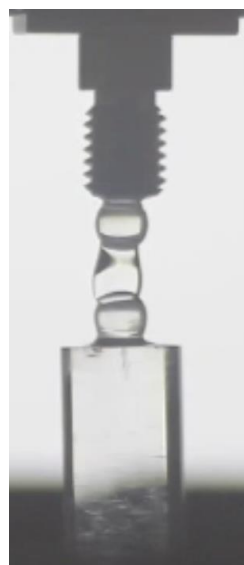


Figura 2. Puente de agua creado experimentalmente.

El objetivo del presente estudio es entender y dar respuesta a la siguiente pregunta de investigación: ¿cómo es el comportamiento dinámico de un puente de agua? Se pretende obtener una respuesta clara a través del estudio del comportamiento experimental de un puente de agua entre dos esferas las cuales simulan dos partículas de suelo, utilizando un montaje de laboratorio.

Por otro lado, al llegar a una conclusión acerca del comportamiento de dichos puentes, se quiere identificar la distancia máxima para la creación del puente en el montaje experimental, al tiempo que se analiza la relación existente entre la velocidad de separación de las partículas y la máxima distancia a la cual el puente se forma entre las dos esferas. También, determinar la relación entre el volumen de agua que contiene el puente y la distancia inicial entre las esferas, identificando la fuerza de ruptura en función de la frecuencia y amplitud de una oscilación dinámica que actúa en un puente de agua. Para así, determinar la relación existente entre la frecuencia y amplitud de las ondas aplicadas al montaje experimental, la distancia entre las esferas y la estabilidad del puente de agua creado entre ambas esferas.

Metodología

Materiales

Los materiales y herramientas que se utilizan para el análisis son:

- Esferas de borosilicato de 4 mm de diámetro las cuales simulan partículas de suelo. Las utilizadas son Winsted precision balls (Anexo 1).
- Celda de carga, con una capacidad máxima de 20 gramos (Anexo 2).
- Una prensa Gilson company 10000 lb que adecúa la distancia entre las esferas y permite determinar una velocidad para la cual las esferas se distancien constantemente (Anexo 3).
- Generador de potencias que produce vibraciones en el parlante. El parlante se encuentra fijo debajo de las esferas para simular ondas sísmicas (Anexo 4).
- Generador de funciones que permite graduar la frecuencia y amplitud de las ondas que emite el generador de potencias (Anexo 5).
- LVDT (Transductor de desplazamiento lineal variable, traducido al español) o sensor de deformación el cual determina la distancia exacta a la cual se encuentran las esferas, en otras palabras, mide la longitud del puente de agua (Anexo 6).
- Visualizador de frecuencias que posibilita graficar las ondas que emite el generador, para así entender de una mejor forma el comportamiento de estas y cómo afectan al puente de agua (Anexo 7).
- Cámara fotográfica con lente macro para un mejor acercamiento y contar con evidencia fotográfica de calidad (Anexo 8).

Montaje experimental

La celda de carga se ubica en el extremo superior de la prensa Gilson y en el extremo inferior se posiciona el parlante adaptado con las conexiones a los generadores de potencia y de frecuencia. Luego, se sitúa una de las esferas de borosilicato en la celda de carga y otra sobre el parlante, de tal manera que queden posicionadas una sobre otra y la prensa nos ayude a controlar la distancia entre estas. Cabe resaltar, que la esfera inferior se coloca sobre una pequeña superficie para no tener contacto directo con el parlante y no ser afectada de manera no esperada por las ondas que se generan. Se añade el sensor de deformación sobre el borde del parlante para medir la distancia entre esferas. El montaje experimental queda preparado para los ensayos, solo falta ubicar la cámara con un trípode para captar de manera estable la toma de cada prueba.



Figura 3. Prensa Gilson con esferas posicionadas correctamente y panel LED a contraluz.

Como instrumento extra se utiliza un panel LED, el cual se localiza a contraluz de las esferas, así en la evidencia fotográfica queda claro el movimiento que sufre el puente de agua y cómo es afectado por las ondas y la variación de su longitud.

Ensayos

Para cumplir con los objetivos planteados y dar respuesta a la pregunta de investigación se desarrollan 4 ensayos que serán explicados más adelante. Los resultados y valores obtenidos en los distintos ensayos e intentos ejecutados se tabularon en una bitácora, la cual se encuentra en los anexos (Anexo 11, Anexo 12, Anexo 13, Anexo 14). Las figuras desarrolladas con base en los datos registrados se realizaron a través de un código en Python para un mejor manejo de los datos, anexado de igual forma al final de este informe (Anexo 15).

Primera campaña de ensayos

El primer ensayo sirve para comprender cuál es la distancia máxima que puede resistir un puente de agua y qué relación tiene la velocidad de distanciamiento con la distancia final alcanzada. Primero se determina una distancia inicial entre las esferas, con un gotero se añade una gota de agua para crear el puente de agua; el volumen de agua no se mide para este ensayo, solamente se añade el agua necesaria para que se cree un puente de agua estable entre las dos esferas. Posterior a esto, se eligen velocidades de separación, en este caso se tomaron las velocidades de 0.5 mm/min y 1 mm/min. Después, con la prensa Gilson se aumenta de forma constante la distancia de separación entre las esferas con las velocidades anteriormente descritas. Las distancias son medidas por el Transductor de desplazamiento lineal variable, colocando como 0 el espacio en el cual ambas esferas se encuentran en contacto. La distancia que medirá el Transductor será la longitud del puente de agua; ya que se toma la distancia entre los bordes de las esferas.

Resultados

Para el primer ensayo presentado se realizaron 50 pruebas. Describiendo los siguientes resultados:

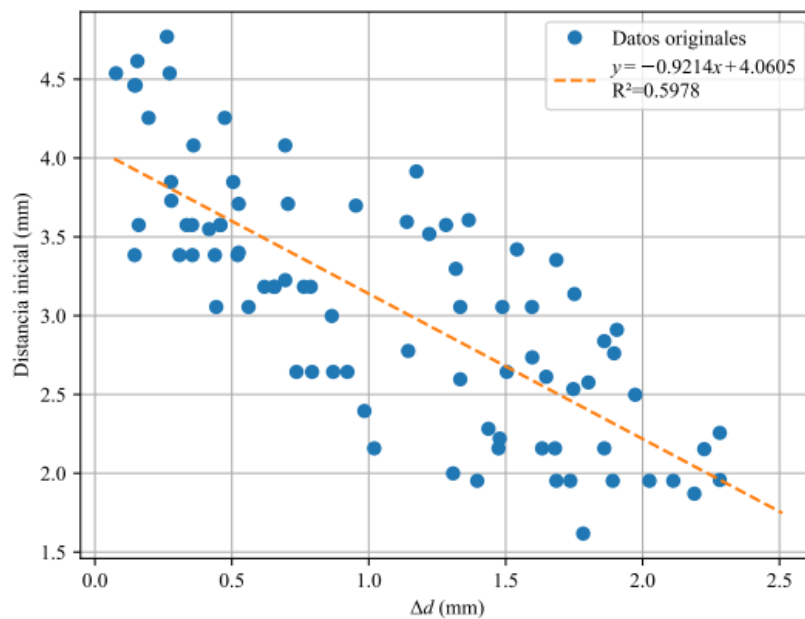


Figura 4. Gráfica Delta distancia vs Distancia inicial.

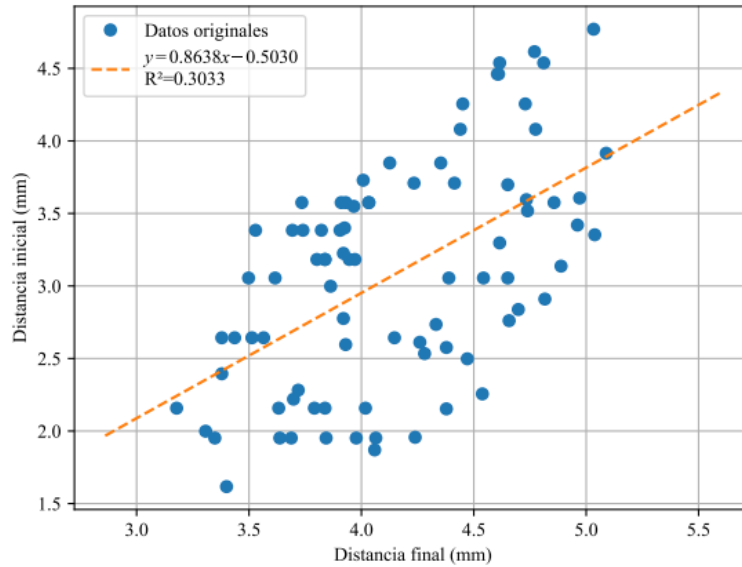


Figura 5. Gráfica Distancia inicial vs Distancia final.

En las anteriores gráficas se aprecia la relación entre la distancia inicial entre las esferas y el delta o diferencia de distancia, en otras palabras, la variación que logra el puente de agua desde que se genera con una distancia inicial hasta la distancia en la cual este alcanza su ruptura (Figura 4).

En la Figura 5 se observa la relación entre la distancia inicial que existe entre las esferas y la distancia final entre estas, en la cual no se crea un puente de agua estable. Por otro lado, se contempla un comportamiento similar en toda la nube de puntos. De acuerdo con los datos, la distancia máxima con la cual se pudo formar un puente de agua estable entre las esferas es menor a 5.033 mm. A pesar de esto, el valor máximo para el delta de la distancia fue un poco mayor a 2 mm.

Adicionalmente, se presenta las relaciones mencionadas anteriormente, diferenciando las velocidades de separación de las esferas por ensayo.

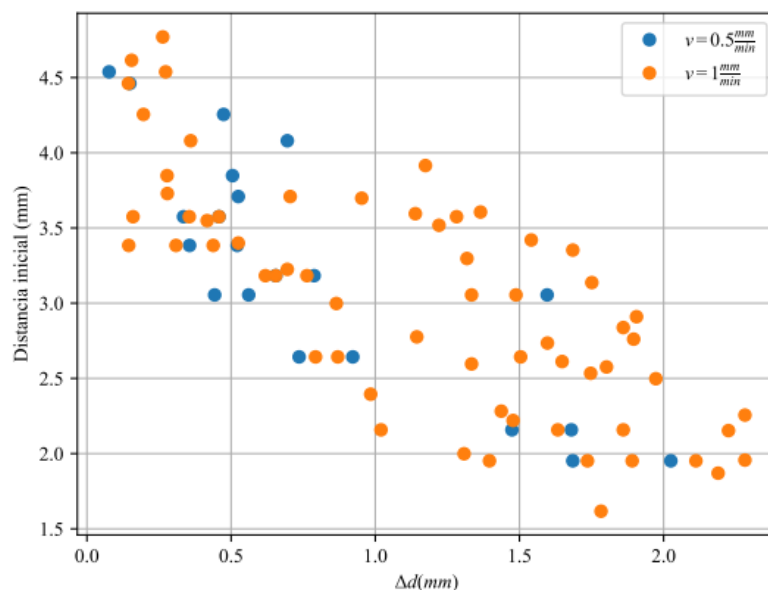


Figura 6. Gráfica Delta distancia vs Distancia inicial distinguiendo velocidades.

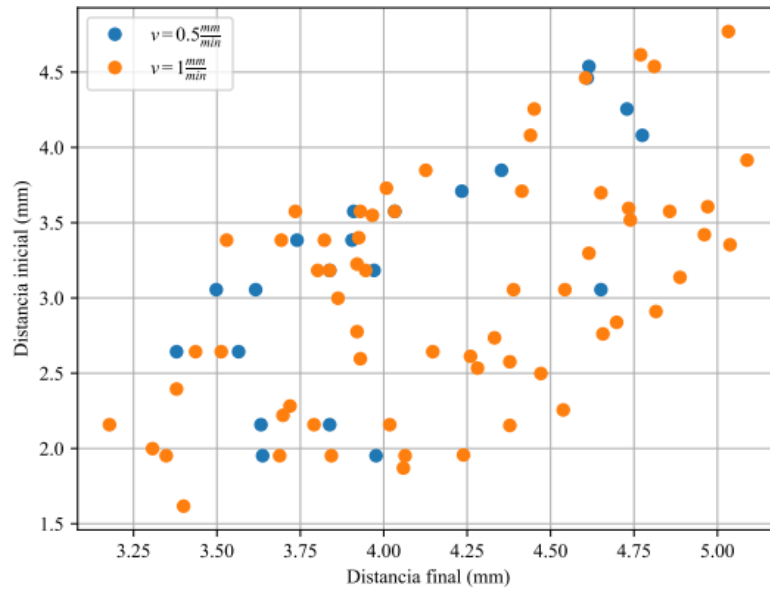


Figura 7. Gráfica Distancia inicial vs Distancia final distinguiendo velocidades.

Discusión

Se observa que en la Figura 4 y en la Figura 5 la nube de puntos tiene un comportamiento similar a pesar de no distinguir por las velocidades de separación para cada intento. Por lo cual se decide realizar las gráficas de Figura 6 y Figura 7 teniendo los mismos parámetros en los ejes cartesianos que para las figuras anteriores. De esto se puede afirmar que la velocidad de separación no tiene relación alguna con la distancia máxima hasta la cual se extiende el puente de agua.

Además, de acuerdo con los ensayos, la distancia en la cual no se crea un puente de agua estable para esferas de borosilicato de 4 mm es de 5.033 mm, distancias mayores tampoco permiten la creación del puente de agua. Sin embargo, con distancias mayores a 4 mm se dificulta la creación del puente.

En la Figura 4 se aprecia como a medida que la distancia inicial entre las esferas aumenta, la distancia que se puede extender el puente o el delta disminuye. En la Figura 5 se evidencia que gracias a que en las pruebas realizadas se aumenta la distancia entre las esferas para generar un fallo en el puente de agua, la distancia final siempre será, así sea mínimamente, mayor que la distancia inicial. Por lo que, si se aumenta la distancia inicial, la distancia final también aumentará, como era de esperarse.

Segunda campaña de ensayos

El segundo ensayo busca encontrar la relación entre la distancia máxima alcanzada en la que se puede generar el puente de agua y el volumen de agua con el cual se genera dicho puente. Es similar al primer ensayo, solamente que la velocidad de separación será un valor fijo de 1 mm/min para este caso. Lo anterior, gracias a que en el primer ensayo se estableció que la velocidad de separación de las partículas no es un parámetro de importancia o que afecte notoriamente al puente de agua. Una variable importante en este ensayo es el volumen de agua que se agrega para generar

el puente, por lo que antes de agregar cada gota se ubica el gotero en una balanza de precisión (*Anexo 9*) y de igual forma se coloca después de haber agregado la gota. Para así, con la diferencia de ambos valores, obtener la cantidad de agua con la que se creó el puente en cada prueba. Se encuentra un punto en el cual la distancia entre partículas no permite generar un puente de agua. Con lo realizado, se obtiene la masa de agua con la cual se creó un puente de agua estable,

Resultados

Para el segundo ensayo se repitieron los pasos con éxito 35 veces, en las cuales se obtuvo lo siguiente:

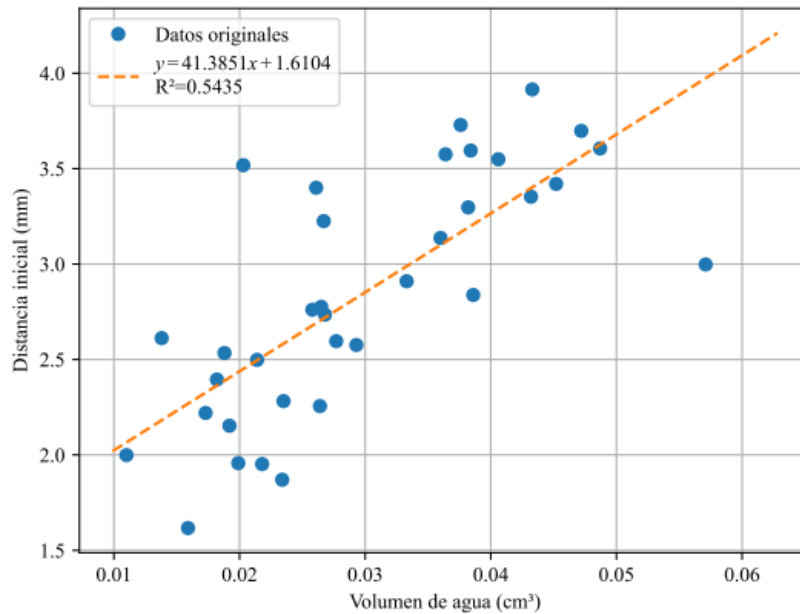


Figura 8. Gráfica Distancia inicial vs Volumen de agua.

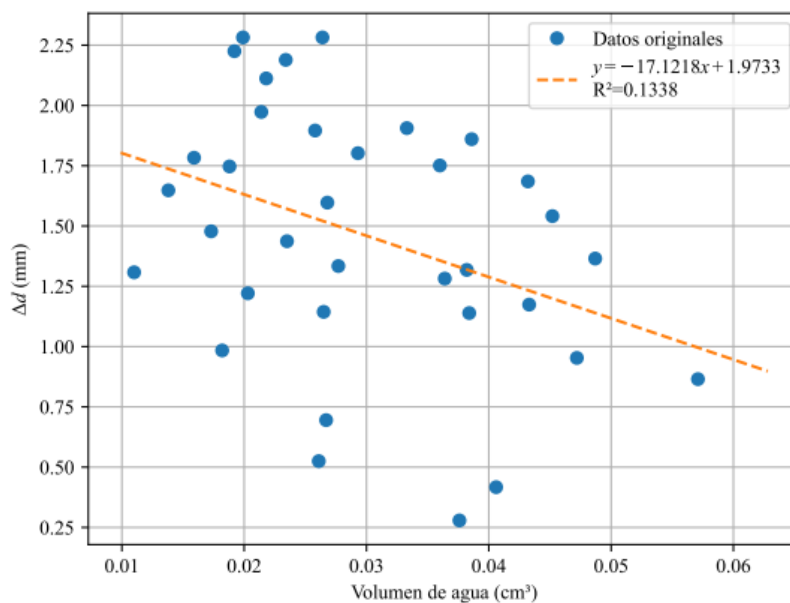


Figura 9. Gráfica Delta distancia vs Volumen de agua.

Se presenta la relación existente entre la distancia inicial de las esferas y el volumen de agua que se necesita para crear un puente de agua estable (Figura 8). También, la relación existente entre el volumen de agua con el cual se genera un puente de agua estable y la distancia a la que se puede extender el puente creado (Figura 9).

Discusión

En la Figura 8 se contempla que, a mayor distancia inicial entre las esferas de borosilicato, mayor es el volumen de agua que se necesita para crear un puente de agua estable. Sin embargo, se presenta un límite de la cantidad de agua que puede tener un puente de agua debido al efecto de la gravedad. En la Figura 9 se contempla de forma ligera, que en un principio el valor de la distancia a la que se puede extender el puente aumenta mientras se va agregando más agua. Luego, disminuye por el peso del agua.

Tercera campaña de ensayos

El tercer ensayo busca identificar cómo se comporta el puente con diferentes frecuencias y amplitudes aplicadas. La distancia de separación entre las esferas no será una variable para este ensayo, por lo que solo se necesita de la prensa para ajustar siempre el valor de distancia de separación establecida para los ensayos que es de 3.003 mm entre los bordes de las esferas. El volumen de agua tampoco será una variable; se decide el volumen de agua con el cual se crearán todos los puentes de agua para este ensayo, que para este caso es un volumen de 30 microlitros. Con una pipeta de precisión (*Anexo 10*) se recogen los 30 microlitros y se procede a crear el puente de agua. Después de esto, se asigna una frecuencia y una amplitud en el generador de frecuencias y se procede a encender el generador de potencias para emitir las ondas con los parámetros anteriormente escogidos. Entre cada intento se varían los valores de frecuencia y amplitud para encontrar con qué valores se logra la ruptura del puente.

Resultados

Para el tercer ensayo se realizaron 187 repeticiones del montaje. Se presentan los resultados de amplitud y frecuencia obtenidos para ruptura del puente de agua.

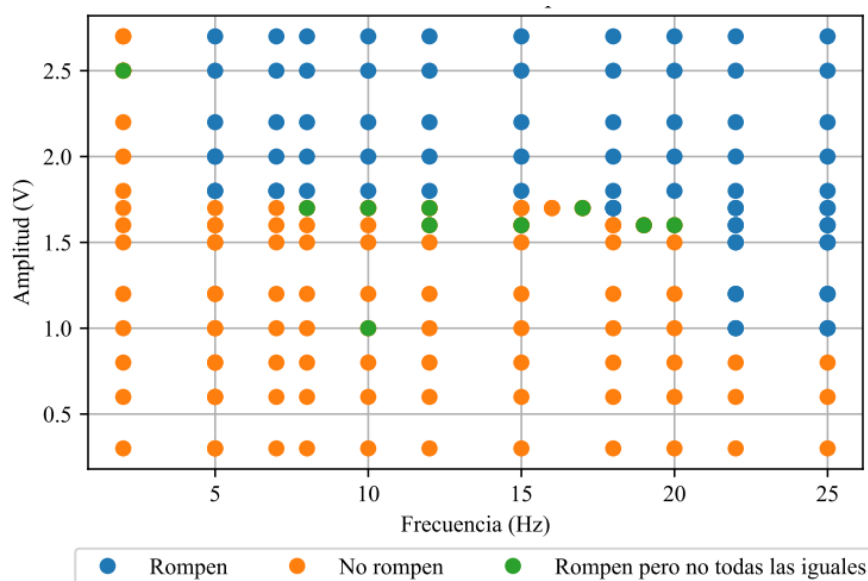


Figura 10. Diagrama de fase análisis de ruptura de puente de agua con varianza de Frecuencia y amplitud.

En la Figura 10 se observa un diagrama de fase que presenta la diferencia entre las frecuencias y las amplitudes que ocasionan la ruptura del puente de agua (azul), las amplitudes y frecuencias que no afectan la estabilidad de dicho puente (naranja) y las amplitudes y frecuencias que en unos ensayos no rompen el puente y en otros si alcanzan a romperlo (verde).

Discusión

En la Figura 10 se observa cómo la amplitud y la frecuencia de las ondas proyectadas sobre el montaje afecta al puente de agua, ocasionando su ruptura o simplemente generándole un movimiento. Las ondas son establecidas como ondas sinusoidales. Se observa de acuerdo con el diagrama de fase de Frecuencias vs Amplitud que al incrementar la frecuencia se necesita de una menor amplitud para generar el colapso del puente de agua. Lo mismo acontece con la amplitud, mientras se incrementa la amplitud, frecuencias menores afectan negativamente el puente de agua.

En el diagrama se nota claramente la línea de separación entre los ensayos en los que se rompe el puente de agua y los que no. Frecuencias mayores a 20 Hz son necesarios para romper el puente de agua con amplitudes de menos de 1 voltio. Mientras que, con amplitudes de 1.8 voltios o superiores desde los 5 Hz se empieza a generar la ruptura de la conexión líquida entre las dos esferas de borosilicato. Cabe mencionar que el colapso es inminente cuando se unifican amplitudes altas y frecuencias elevadas, como se observa en la esquina superior derecha de nuestro diagrama de fase en la Figura 10, donde se concentran la mayoría de los intentos y repeticiones en los que el puente ha perdido su estabilidad y ha colapsado.

Cuarta campaña de ensayos

El último ensayo busca identificar la relación existente entre la distancia presente entre las esferas y la frecuencia de la onda que afecta el montaje. En este, la amplitud no será una variable, se toma una amplitud constante de 1.6 voltios. El volumen de agua será nuevamente 30 microlitros. Se procede a variar distancias realizando el experimento variando las frecuencias. Los valores utilizados en las frecuencias son 2, 5, 8, 10, 12, 15, 18, 20, 22, 25 Hz. Las frecuencias mencionadas se utilizaron con cada distancia registrada en los ensayos. Por otra parte, se escribió en qué ensayos el puente de agua se rompió.

Resultados

Para el cuarto y último ensayo se realizaron 91 repeticiones. A continuación, se encuentra la gráfica de la distancia entre los bordes de cada esfera dividida entre el diámetro de las esferas vs la frecuencia.

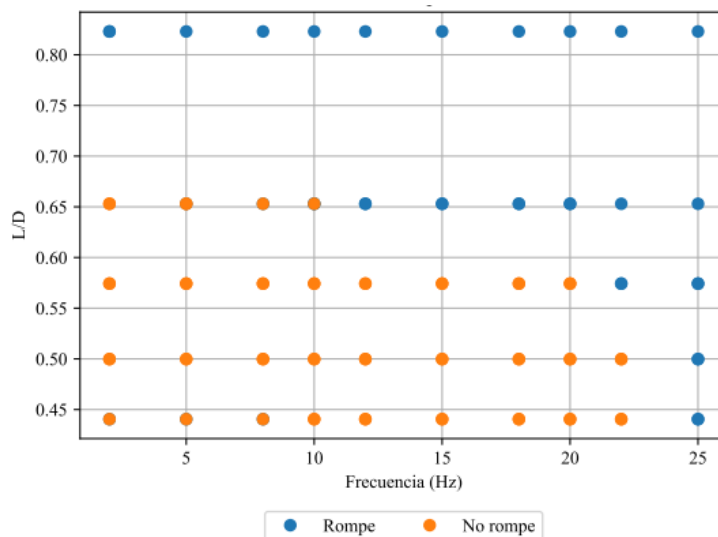


Figura 11. Diagrama de fase de ruptura de puente de agua con varianza de Distancia entre las esferas y Frecuencia.

Se observa en la Figura 11 un diagrama de fase que ayuda a diferenciar las longitudes y frecuencias para las cuales el puente de agua colapsó (azul) y las longitudes y frecuencias para las cuales el puente de agua se mantuvo estable (naranja).

Discusión

En la Figura 11 se observa que en lugar de ubicar en el eje Y la distancia entre las esferas se decide colocar el resultado de dividir dicha distancia entre el diámetro de cada esfera. Esto se realiza con el fin de que el parámetro graficado sea adimensional y comprender de una mejor manera cómo afecta la frecuencia al puente de agua.

Se obtiene un comportamiento similar al diagrama de fase de la Figura 10, cambiando claramente el parámetro del eje Y. A distancias mayores entre las esferas es necesaria de una menor frecuencia para alcanzar el colapso de la conexión entre partículas. De igual manera, para frecuencias mayores será necesaria una distancia menor para generar dicho colapso.

En el diagrama se nota claramente la línea de separación entre los ensayos en los que se rompe el puente de agua y los que no. Distancias mayores a los 3.1 milímetros (0.82, dividiendo entre el diámetro de las esferas aproximadamente) generan un colapso inmediato del puente de agua cuando se aplica la más mínima frecuencia en el montaje. Para distancias menores a los 2 milímetros (0.5, dividiendo entre el diámetro de las esferas) se necesitan frecuencias de 25 hz o mayores para desestabilizar la conexión líquida entre las esferas.

Cabe mencionar que el colapso es inminente cuando se unifican frecuencias elevadas con una apertura entre esferas de longitud apreciable, como se observa en la esquina superior derecha de nuestro diagrama de fase en la Figura 11, donde se concentran la mayoría de los intentos y repeticiones en los que el puente ha perdido su estabilidad y ha colapsado.

Conclusión

Gracias al desarrollo de los ensayos planteados repetidas veces en el montaje experimental dispuesto para este fin se lograron cumplir los objetivos y entender de forma clara la pregunta de investigación planteada.

Se alcanza un delta máximo de 2.025 mm con una distancia inicial de 1.952 mm y una velocidad de apertura de las esferas de 0.5 mm/min. Además, la distancia desde la cual no se creó un puente de agua estable fue de 5.033 mm. Por otro lado, la velocidad de separación de las partículas de suelo no es un factor que influye en la longitud que puede soportar el puente de agua.

Con una mayor distancia inicial es necesaria una mayor cantidad de agua (volumen) para lograr un puente estable, teniendo en cuenta la distancia de 5.033 mm, distancia a la cual ya no es estable un puente de agua. En cuanto al volumen de agua y el delta de la distancia que presenta el puente de agua se observa en un inicio que mientras una variable aumenta la otra igual. Sin embargo, cuando se incrementa aún más el volumen de agua, el delta tiende a disminuir.

La frecuencia y la amplitud juegan un papel importante dentro de la estabilidad de las conexiones líquidas entre las esferas en el montaje experimental; ya que se observa cuáles son las frecuencias y amplitudes que afectan dicha conexión; frecuencias mayores a 25 Hz son críticas para los puentes de agua, al igual que amplitudes mayores o iguales a los 1.8 voltios. A mayor amplitud se necesitará de una menor frecuencia para romper el puente de agua entre partículas y a mayor frecuencia se necesitará de una menor amplitud para romper el puente de agua entre partículas.

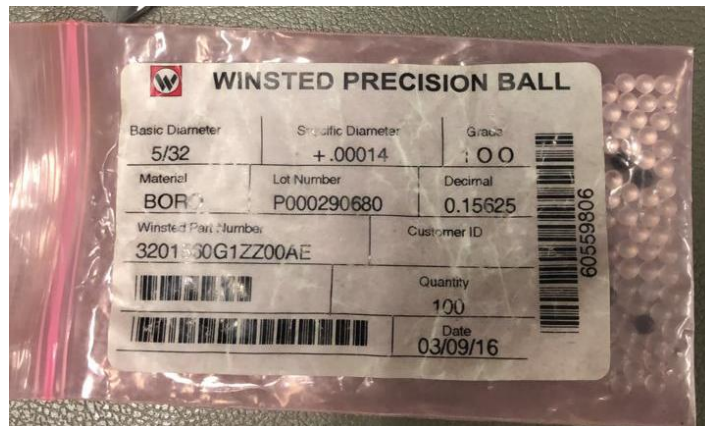
La distancia entre las partículas juega un papel importante en la desestabilización de los puentes de agua. Esto, gracias a que como se vio en la Figura 11, a distancias muy grandes entre partículas cualquier onda por muy pequeña que sea la frecuencia con la que actúa generará un colapso en los puentes de agua. Por ende, distancias mayores a los 3.1 milímetros son críticas para la estabilidad de dichos puentes. Y a menor distancia entre partículas el puente de agua resiste frecuencias mayores.

Por último, en las gráficas realizadas para el análisis de los datos y resultados obtenidos se aprecia una dispersión considerable, la cual es mucho mayor en la Figura 9. Gráfica Delta distancia vs Volumen de agua..

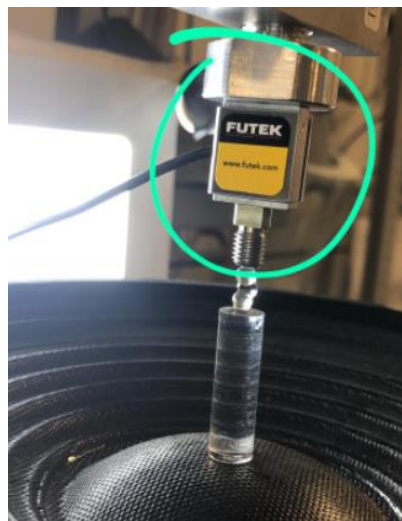
Referencias

- Armouti, N. (2015). *Earthquake Engineering Theory and Implementation with the 2015 International Building Code*. McGraw-Hill Education.
- ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. (2010). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-resistente, NSR-10*. Bogotá: AIS.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Lievano, D., Velankar, S., & McCarthy, J. (2017). The rupture force of liquid bridges in two and three particle systems. *Powder Technology*, Vol 313, PP 18-26.
- Mielniczuk, B., Hueckel, T., & El-Youssouf, M. (2014). Evaporation-induced evolution of the capillary force between two grains. *Granular matter*, Vol 16, PP 815-828.
- Mielniczuk, B., Millet, O., Gagneux, G., & El-Youssoufi, M. (2017). Properties of pendular liquid bridges determined on Delaunay's roulettes. *Powders and Grains 2017 – 8th International Conference on Micromechanics on Granular Media*. Montpellier, Francia: EPJ Web conf.
- Murali, A., Godson, M., Shanmugam, G., & Subramani, N. (2020). Applicability Analysis of Stone Column Against Liquefaction Under Repeated Dynamic Events. *Ground Improvement and Reinforced Soil Structures*, Vol 2, PP 305-3016.
- Ovando, E., Mussio, V., Rodriguez, M., & Acosta, J. (2015). Evaluation of soil liquefaction from surface analysis. *Geofísica internacional*, Vol 54, PP 95-109.
- Pastor, J., Tomás, R., Cano, M., & Riquelme, A. (2018). Estudio comparativo del potencial de licuación de suelos usando las normas españolas y el Eurocódigo. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Vol 70, PP 761-778.
- Seed, B., & Idriss, I. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol 97, PP 1249-1273.
- Somwanshi, A., Ghan, S., & Tipnis, M. (2020). Dynamic Compaction of Sandy and Silty Soils Near Delhi for Liquefaction Mitigation. *Ground Improvement and Reinforced Soil Structures*, Vol 2, PP 167-176.
- Tlatempa, G. (2013). Criterios geológicos-hidrológicos para recomendaciones del uso de suelo en zonas conurbadas sujetas a afectaciones por lluvias intensas. Caso de estudio: sur de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, Vol 80, PP 36-54.
- Tsamopoulos, J., Chen, T.-Y., & Borkar, A. (1992). Viscous oscillations of capillary bridges. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 235, PP 579-609.
- Tsamopoulos, J., Mollot, D., & Chen, T.-Y. (1993). Nonlinear dynamics of capillary bridges: experiments. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol 255, PP 411-435.

Anexos



Anexo 1. Etiqueta física de referencias de las esferas.



Anexo 2. Celda de carga.



Anexo 3. Prensa Gilson.



Anexo 4. Generador de potencias.



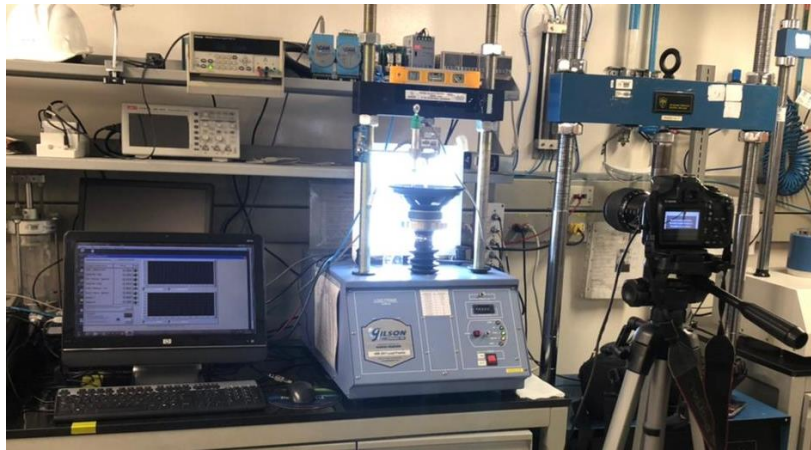
Anexo 5. Generador de funciones.



Anexo 6. Sensor de deformación.



Anexo 7. Visualizador de funciones.



Anexo 8. Montaje experimental.



Anexo 9. Balanza de precisión.



Anexo 10. Pipeta de precisión.

PRIMER ENSAYO	Fecha	Ensayo	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Delta d	V (mm/min)
	20210820	0001	2.158	3.838	1.680	0.5
	20210820	0002	2.158	3.632	1.474	0.5
	20210820	0003	2.158	3.791	1.633	1
	20210820	0004	2.158	4.018	1.860	1
	20210820	0005	2.158	3.178	1.020	1
	20210823	0006	1.952	3.637	1.685	0.5
	20210823	0007	1.952	3.977	2.025	0.5
	20210823	0008	1.952	3.348	1.396	1
	20210823	0009	1.952	3.843	1.891	1
	20210823	0010	1.952	3.688	1.736	1
	20210823	0011	2.643	3.513	0.870	1
	20210823	0012	2.643	3.436	0.793	1
	20210823	0013	2.643	4.147	1.504	1
	20210823	0014	2.643	3.565	0.922	0.5
	20210823	0015	2.643	3.379	0.736	0.5
	20210823	0016	3.055	3.616	0.561	0.5
	20210823	0017	3.055	3.498	0.443	0.5
	20210823	0018	3.055	4.651	1.596	0.5
	20210823	0019	3.055	4.389	1.334	1
	20210823	0020	3.055	4.543	1.488	1
	20210824	0021	3.183	3.802	0.619	1
	20210824	0022	3.183	3.946	0.763	1
	20210824	0023	3.183	3.838	0.655	1
	20210824	0024	3.183	3.971	0.788	0.5
	20210824	0025	3.183	3.838	0.655	0.5
	20210824	0026	3.384	3.905	0.521	0.5
	20210824	0027	3.384	3.740	0.356	0.5
	20210824	0028	3.384	3.529	0.145	1
	20210824	0029	3.384	3.693	0.309	1
	20210824	0030	3.384	3.822	0.438	1
	20210824	0031	3.575	3.735	0.160	1
	20210824	0032	3.575	4.033	0.458	1
	20210824	0033	3.575	3.930	0.355	1
	20210824	0034	3.575	3.910	0.335	0.5
	20210824	0035	3.575	4.033	0.458	0.5
	20210824	0036	3.709	4.234	0.525	0.5
	20210824	0037	3.709	4.414	0.705	1
	20210824	0038	3.848	4.126	0.278	1
	20210824	0039	3.848	4.353	0.505	0.5
	20210824	0040	4.080	4.775	0.695	0.5
	20210824	0041	4.080	4.440	0.360	1
	20210824	0042	4.255	4.451	0.196	1
	20210824	0043	4.255	4.729	0.474	0.5
	20210824	0044	4.461	4.610	0.149	0.5
	20210824	0045	4.461	4.605	0.144	1
	20210824	0046	4.538	4.811	0.273	1
	20210824	0047	4.538	4.615	0.077	0.5
	20210824	0048	4.615	4.770	0.155	1
	20210824	0049	4.770	5.033	0.263	1
	20210824	0050	5.033	No se pudo crear		1

Anexo 11. Bitácora de trabajo para el primer ensayo.

SEGUNDO ENSAYO	20210831	0051	1.999	3.307	1.308	1	0.01100
	20210831	0052	2.998	3.863	0.865	1	0.05710
	20210831	0053	2.282	3.719	1.437	1	0.02350
	20210831	0054	2.596	3.93	1.334	1	0.02770
	20210831	0055	2.776	3.92	1.144	1	0.02650
	20210831	0056	3.225	3.92	0.695	1	0.02670
	20210831	0057	3.4	3.925	0.525	1	0.02610
	20210831	0058	3.549	3.966	0.417	1	0.04060
	20210831	0059	3.729	4.008	0.279	1	0.03760
	20210831	0060	2.395	3.379	0.984	1	0.01820
	20210909	0061	1.870	4.059	2.189	1	0.02340
	20210909	0062	3.595	4.734	1.139	1	0.03840
	20210909	0063	2.838	4.698	1.86	1	0.03860
	20210909	0064	3.297	4.615	1.318	1	0.03820
	20210909	0065	1.957	4.239	2.282	1	0.01990
	20210909	0066	2.22	3.698	1.478	1	0.01730
	20210909	0067	3.698	4.651	0.953	1	0.04720
	20210909	0068	3.606	4.971	1.365	1	0.04870
	20210909	0069	2.761	4.657	1.896	1	0.02580
	20210909	0070	3.42	4.961	1.541	1	0.04520
	20210909	0071	2.498	4.471	1.973	1	0.02140
	20210909	0072	2.256	4.538	2.282	1	0.02640
	20210909	0073	2.576	4.378	1.802	1	0.02930
	20210909	0074	2.612	4.26	1.648	1	0.01380
	20210909	0075	3.518	4.739	1.221	1	0.02030
	20210910	0076	1.617	3.4	1.783	1	0.01590
	20210910	0077	1.952	4.064	2.112	1	0.02180
	20210910	0078	2.153	4.378	2.225	1	0.01920
	20210910	0079	2.534	4.281	1.747	1	0.01880
	20210910	0080	2.735	4.332	1.597	1	0.02680
	20210910	0081	2.91	4.816	1.906	1	0.03330
	20210910	0082	3.137	4.888	1.751	1	0.03600
	20210910	0083	3.353	5.038	1.685	1	0.04320
	20210910	0084	3.575	4.857	1.282	1	0.03640
	20210910	0085	3.915	5.089	1.174	1	0.04330

Anexo 12. Bitácora de trabajo para el segundo ensayo.

TERCER ENSAYO	Fecha	Ensayo	Ditancia	a (Voltios)	w (Hz)	Volumen de agua (cm3)	Señal de celda	Video	Comentarios
	20210923	0086	3.003	0.3	2	0.03	Si	Si	
	20210923	0087	3.003	0.3	5	0.03	Si	Si	
	20210923	0088	3.003	0.3	5	0.03	Si	Si	
	20210923	0089	3.003	0.3	7	0.03	Si	Si	
	20210923	0090	3.003	0.3	8	0.03	Si	Si	
	20210923	0091	3.003	0.3	10	0.03	Si	Si	
	20210923	0092	3.003	0.3	12	0.03	Si	Si	
	20210923	0093	3.003	0.3	15	0.03	Si	Si	
	20210923	0094	3.003	0.3	18	0.03	Si	Si	
	20210923	0095	3.003	0.3	20	0.03	Si	Si	
	20210923	0096	3.003	0.6	2	0.03	Si	Si	
	20210923	0097	3.003	0.6	5	0.03	Si	Si	
	20210923	0098	3.003	0.6	5	0.03	Si	Si	
	20210923	0099	3.003	0.6	7	0.03	Si	Si	
	20210923	0100	3.003	0.6	8	0.03	Si	Si	
	20210923	0101	3.003	0.6	10	0.03	Si	Si	
	20210923	0102	3.003	0.6	12	0.03	Si	Si	
	20210923	0103	3.003	0.6	15	0.03	Si	Si	
	20210923	0104	3.003	0.6	18	0.03	Si	Si	
	20210923	0105	3.003	0.6	20	0.03	Si	Si	
	20210923	0106	3.003	0.8	2	0.03	Si	Si	
	20210923	0107	3.003	0.8	5	0.03	Si	Si	
	20210923	0108	3.003	0.8	5	0.03	Si	Si	
	20210923	0109	3.003	0.8	7	0.03	Si	Si	
	20210923	0110	3.003	0.8	8	0.03	Si	Si	
	20210923	0111	3.003	0.8	12	0.03	Si	Si	
	20210923	0112	3.003	0.8	10	0.03	Si	Si	
	20210923	0113	3.003	0.8	15	0.03	Si	Si	
	20210923	0114	3.003	0.8	18	0.03	Si	Si	
	20210923	0115	3.003	0.8	20	0.03	Si	Si	
	20210923	0116	3.003	1	2	0.03	Si	Si	
	20210923	0117	3.003	1	5	0.03	Si	Si	
	20210923	0118	3.003	1	5	0.03	Si	Si	
	20210923	0119	3.003	1	7	0.03	Si	Si	
	20210923	0120	3.003	1	8	0.03	Si	Si	
	20210923	0121	3.003	1	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20210923	0122	3.003	1	10	0.03	Si	Si	
	20210923	0123	3.003	1	12	0.03	Si	Si	
	20210923	0124	3.003	1	15	0.03	Si	Si	
	20210923	0125	3.003	1	18	0.03	Si	Si	
	20210923	0126	3.003	1	20	0.03	Si	Si	

	20210930	0127	3.003	1.2	2	0.03	Si	Si	
	20210930	0128	3.003	1.2	5	0.03	Si	Si	
	20210930	0129	3.003	1.2	5	0.03	Si	Si	
	20210930	0130	3.003	1.2	7	0.03	Si	Si	
	20210930	0131	3.003	1.2	8	0.03	Si	Si	
	20210930	0132	3.003	1.2	10	0.03	Si	Si	
	20210930	0133	3.003	1.2	12	0.03	Si	Si	
	20210930	0134	3.003	1.2	15	0.03	Si	Si	
	20210930	0135	3.003	1.2	18	0.03	Si	Si	
	20210930	0136	3.003	1.2	20	0.03	Si	Si	
	20210930	0137	3.003	1.5	2	0.03	Si	Si	
	20210930	0138	3.003	1.5	5	0.03	Si	Si	
	20210930	0139	3.003	1.5	5	0.03	Si	Si	
	20210930	0140	3.003	1.5	7	0.03	Si	Si	
	20210930	0141	3.003	1.5	8	0.03	Si	Si	
	20210930	0142	3.003	1.5	10	0.03	Si	Si	
	20210930	0143	3.003	1.5	12	0.03	Si	Si	
	20210930	0144	3.003	1.5	15	0.03	Si	Si	
	20210930	0145	3.003	1.5	18	0.03	Si	Si	
	20210930	0146	3.003	1.5	20	0.03	Si	Si	
	20210930	0147	3.003	1.6	2	0.03	Si	Si	
	20210930	0148	3.003	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20210930	0149	3.003	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20210930	0150	3.003	1.6	7	0.03	Si	Si	
	20210930	0151	3.003	1.6	8	0.03	Si	Si	
	20210930	0152	3.003	1.6	10	0.03	Si	Si	
	20210930	0153	3.003	1.6	12	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0154	3.003	1.6	12	0.03	Si	Si	
	20210930	0155	3.003	1.6	15	0.03	Si	Si	
	20210930	0156	3.003	1.6	15	0.03	Si	Si	
	20210930	0157	3.003	1.6	15	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0158	3.003	1.6	18	0.03	Si	Si	
	20210930	0159	3.003	1.6	18	0.03	Si	Si	
	20210930	0160	3.003	1.6	20	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0161	3.003	1.6	20	0.03	Si	Si	
	20210930	0162	3.003	1.6	19	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0163	3.003	1.6	19	0.03	Si	Si	
	20210930	0164	3.003	1.6	19	0.03	Si	Si	
	20210930	0165	3.003	1.7	2	0.03	Si	Si	
	20210930	0166	3.003	1.7	5	0.03	Si	Si	
	20210930	0167	3.003	1.7	7	0.03	Si	Si	
	20210930	0168	3.003	1.7	8	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0169	3.003	1.7	8	0.03	Si	Si	
	20210930	0170	3.003	1.7	10	0.03	Si	Si	
	20210930	0171	3.003	1.7	10	0.03	Si	Si	
	20210930	0172	3.003	1.7	10	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0173	3.003	1.7	12	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0174	3.003	1.7	12	0.03	Si	Si	
	20210930	0175	3.003	1.7	12	0.03	Si	Si	
	20210930	0176	3.003	1.7	15	0.03	Si	Si	
	20210930	0177	3.003	1.7	15	0.03	Si	Si	
	20210930	0178	3.003	1.7	18	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0179	3.003	1.7	18	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0180	3.003	1.7	18	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0181	3.003	1.7	17	0.03	Si	Si	Rompió
	20210930	0182	3.003	1.7	17	0.03	Si	Si	
	20210930	0183	3.003	1.7	17	0.03	Si	Si	
	20210930	0184	3.003	1.7	16	0.03	Si	Si	
	20210930	0185	3.003	1.7	16	0.03	Si	Si	
	20211029	0186	3.003	0.3	22	0.03	Si	Si	
	20211029	0187	3.003	0.3	25	0.03	Si	Si	
	20211029	0188	3.003	0.6	22	0.03	Si	Si	
	20211029	0189	3.003	0.6	25	0.03	Si	Si	
	20211029	0190	3.003	0.8	22	0.03	Si	Si	
	20211029	0191	3.003	0.8	25	0.03	Si	Si	
	20211029	0192	3.003	1	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0193	3.003	1	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0194	3.003	1	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0195	3.003	1	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0196	3.003	1.2	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0197	3.003	1.2	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0198	3.003	1.2	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0199	3.003	1.2	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0200	3.003	1.5	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0201	3.003	1.5	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0202	3.003	1.5	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0203	3.003	1.5	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0204	3.003	1.6	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0205	3.003	1.6	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0206	3.003	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0207	3.003	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0208	3.003	1.7	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0209	3.003	1.7	22	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0210	3.003	1.7	25	0.03	Si	Si	Rompió
	20211029	0211	3.003	1.7	25	0.03	Si	Si	Rompió

	20211104	0212	3.003	1.8	2	0.03	Si	Si	
	20211104	0213	3.003	1.8	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0214	3.003	1.8	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0215	3.003	1.8	7	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0216	3.003	1.8	7	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0217	3.003	1.8	8	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0218	3.003	1.8	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0219	3.003	1.8	12	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0220	3.003	1.8	15	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0221	3.003	1.8	18	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0222	3.003	1.8	20	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0223	3.003	1.8	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0224	3.003	1.8	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0225	3.003	2	2	0.03	Si	Si	
	20211104	0226	3.003	2	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0227	3.003	2	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0228	3.003	2	7	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0229	3.003	2	8	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0230	3.003	2	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0231	3.003	2	12	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0232	3.003	2	15	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0233	3.003	2	18	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0234	3.003	2	20	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0235	3.003	2	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0236	3.003	2	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0237	3.003	2.2	2	0.03	Si	Si	
	20211104	0238	3.003	2.2	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0239	3.003	2.2	7	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0240	3.003	2.2	8	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0241	3.003	2.2	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0242	3.003	2.2	12	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0243	3.003	2.2	15	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0244	3.003	2.2	18	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0245	3.003	2.2	20	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0246	3.003	2.2	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0247	3.003	2.2	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0248	3.003	2.5	2	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0249	3.003	2.5	2	0.03	Si	Si	
	20211104	0250	3.003	2.5	2	0.03	Si	Si	
	20211104	0251	3.003	2.5	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0252	3.003	2.5	7	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0253	3.003	2.5	8	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0254	3.003	2.5	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0255	3.003	2.5	12	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0256	3.003	2.5	15	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0257	3.003	2.5	20	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0258	3.003	2.5	18	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0259	3.003	2.5	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0260	3.003	2.5	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211104	0261	3.003	2.7	2	0.03	Si	Si	
	20211104	0262	3.003	2.7	2	0.03	Si	Si	
	20211104	0263	3.003	2.7	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0264	3.003	2.7	7	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0265	3.003	2.7	8	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0266	3.003	2.7	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0267	3.003	2.7	12	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0268	3.003	2.7	15	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0269	3.003	2.7	18	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0270	3.003	2.7	20	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0271	3.003	2.7	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0272	3.003	2.7	25	0.03	Si	Si	Rompío

Anexo 13. Bitácora de trabajo para el tercer ensayo.

CUARTO ENSAYO	Fecha	Ensayo	Ditancia	a (Voltios)	w (Hz)	Volumen de agua (cm3)	Señal de celda	Video	Comentarios
	20211111	0273	1.762	1.6	2	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0274	1.762	1.6	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0275	1.762	1.6	8	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0276	1.762	1.6	10	0.03	Si	Si	
	20211111	0277	1.762	1.6	10	0.03	Si	Si	
	20211111	0278	1.762	1.6	12	0.03	Si	Si	
	20211111	0279	1.762	1.6	15	0.03	Si	Si	
	20211111	0280	1.762	1.6	15	0.03	Si	Si	
	20211111	0281	1.762	1.6	12	0.03	Si	Si	
	20211111	0282	1.762	1.6	2	0.03	Si	Si	
	20211111	0283	1.762	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20211111	0284	1.762	1.6	8	0.03	Si	Si	
	20211111	0285	1.762	1.6	18	0.03	Si	Si	
	20211111	0286	1.762	1.6	18	0.03	Si	Si	
	20211111	0287	1.762	1.6	20	0.03	Si	Si	
	20211111	0288	1.762	1.6	20	0.03	Si	Si	
	20211111	0289	1.762	1.6	22	0.03	Si	Si	
	20211111	0290	1.762	1.6	22	0.03	Si	Si	
	20211111	0291	1.762	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0292	1.762	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0293	1.999	1.6	2	0.03	Si	Si	
	20211111	0294	1.999	1.6	2	0.03	Si	Si	
	20211111	0295	1.999	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20211111	0296	1.999	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20211111	0297	1.999	1.6	8	0.03	Si	Si	
	20211111	0298	1.999	1.6	8	0.03	Si	Si	
	20211111	0299	1.999	1.6	10	0.03	Si	Si	
	20211111	0300	1.999	1.6	10	0.03	Si	Si	
	20211111	0301	1.999	1.6	12	0.03	Si	Si	
	20211111	0302	1.999	1.6	12	0.03	Si	Si	
	20211111	0303	1.999	1.6	15	0.03	Si	Si	
	20211111	0304	1.999	1.6	15	0.03	Si	Si	
	20211111	0305	1.999	1.6	18	0.03	Si	Si	
	20211111	0306	1.999	1.6	18	0.03	Si	Si	
	20211111	0307	1.999	1.6	20	0.03	Si	Si	
	20211111	0308	1.999	1.6	20	0.03	Si	Si	
	20211111	0309	1.999	1.6	22	0.03	Si	Si	
	20211111	0310	1.999	1.6	22	0.03	Si	Si	
	20211111	0311	1.999	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0312	1.999	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0313	2.297	1.6	2	0.03	Si	Si	
	20211111	0314	2.297	1.6	2	0.03	Si	Si	
	20211111	0315	2.297	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20211111	0316	2.297	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20211111	0317	2.297	1.6	8	0.03	Si	Si	
	20211111	0318	2.297	1.6	8	0.03	Si	Si	
	20211111	0319	2.297	1.6	10	0.03	Si	Si	
	20211111	0320	2.297	1.6	10	0.03	Si	Si	
	20211111	0321	2.297	1.6	12	0.03	Si	Si	
	20211111	0322	2.297	1.6	12	0.03	Si	Si	
	20211111	0323	2.297	1.6	15	0.03	Si	Si	
	20211111	0324	2.297	1.6	15	0.03	Si	Si	
	20211111	0325	2.297	1.6	18	0.03	Si	Si	
	20211111	0326	2.297	1.6	18	0.03	Si	Si	
	20211111	0327	2.297	1.6	20	0.03	Si	Si	
	20211111	0328	2.297	1.6	20	0.03	Si	Si	
	20211111	0329	2.297	1.6	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0330	2.297	1.6	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0331	2.297	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211111	0332	2.297	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0333	2.612	1.6	2	0.03	Si	Si	
	20211112	0334	2.612	1.6	2	0.03	Si	Si	
	20211112	0335	2.612	1.6	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0336	2.612	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20211112	0337	2.612	1.6	5	0.03	Si	Si	
	20211112	0338	2.612	1.6	8	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0339	2.612	1.6	8	0.03	Si	Si	
	20211112	0340	2.612	1.6	10	0.03	Si	Si	
	20211112	0341	2.612	1.6	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0342	2.612	1.6	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0343	2.612	1.6	12	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0344	2.612	1.6	12	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0345	2.612	1.6	15	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0346	2.612	1.6	15	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0347	2.612	1.6	18	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0348	2.612	1.6	18	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0349	2.612	1.6	20	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0350	2.612	1.6	20	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0351	2.612	1.6	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0352	2.612	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0353	3.292	1.6	2	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0354	3.292	1.6	2	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0355	3.292	1.6	5	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0356	3.292	1.6	8	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0357	3.292	1.6	10	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0358	3.292	1.6	12	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0359	3.292	1.6	15	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0360	3.292	1.6	18	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0361	3.292	1.6	20	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0362	3.292	1.6	22	0.03	Si	Si	Rompío
	20211112	0363	3.292	1.6	25	0.03	Si	Si	Rompío

Anexo 14.Bitácora de trabajo para el cuarto ensayo.

```
In [ ]: import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

import matplotlib
matplotlib.rcParams.update({'font.family': 'Times New Roman'})

matplotlib.rcParams['mathtext.fontset'] = 'custom'
matplotlib.rcParams['mathtext.rm'] = 'Times New Roman'
matplotlib.rcParams['mathtext.it'] = 'Times New Roman:italic'
matplotlib.rcParams['mathtext.bf'] = 'Times New Roman:bold'

df = pd.read_csv('data/primeras4.csv')
```

```
In [ ]: df.head()
```

```
Out[ ]:
```

	Fecha	Ensayo	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	Delta d	V (mm/min)	Peso inicial	Peso final	Volumen de agua (cm3)
0	20210820	1	2.158	3.838	1.680	0.5	NaN	NaN	NaN
1	20210820	2	2.158	3.632	1.474	0.5	NaN	NaN	NaN
2	20210820	3	2.158	3.791	1.633	1.0	NaN	NaN	NaN
3	20210820	4	2.158	4.018	1.860	1.0	NaN	NaN	NaN
4	20210820	5	2.158	3.178	1.020	1.0	NaN	NaN	NaN

```
In [ ]: _X = df['Distancia final (mm)'].values
_Y = df['Distancia inicial (mm)'].values

u = (np.linalg.solve(np.array([[len(_X), np.sum(_X)], [
    np.sum(_X), np.sum(_X**2)]]), np.array([[np.sum(_Y)], [np.sum(_Y*_X)]]).T)[0]

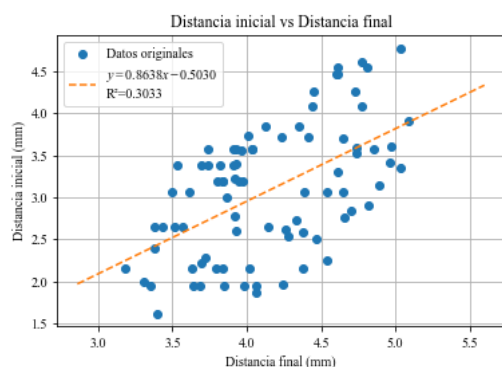
_XR = np.array([np.min(_X)*0.9, np.max(_X)*1.1])
_Yr = u[0] + _XR*u[1]

_Yrr = u[0] + _X*u[1]
Sr = np.sum((_Y - _Yrr)**2)
St = np.sum((_Y - np.average(_Y))**2)
R2 = (St-Sr)/St

plt.plot(_X, _Y, 'o', label='Datos originales')
plt.plot(_XR, _Yr, '--', label=r'$'+f'y={u[1]:.4f}x{u[0]:.4f}'+r'$'+f'\n'+f'R^2={R2:.4f}')

plt.grid()
plt.xlabel('Distancia final (mm)')
plt.ylabel('Distancia inicial (mm)')
plt.title('Distancia inicial vs Distancia final')

plt.legend()
plt.show()
```



```
In [ ]:
_Y = df['Distancia inicial (mm)'].values
_X = df['Delta d'].values

u = (np.linalg.solve(np.array([[len(_X), np.sum(_X)], [
    np.sum(_X), np.sum(_X**2)]]), np.array([[np.sum(_Y), [np.sum(_Y*_X)]]]).T)[0]

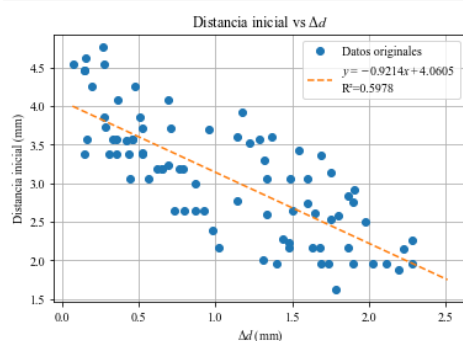
_XR = np.array([np.min(_X)*0.9, np.max(_X)*1.1])
_Yr = u[0]+_XR*u[1]

_Yrr = u[0]+_X*u[1]
Sr = np.sum((_Y - _Yrr)**2)
St = np.sum((_Y - np.average(_Y))**2)
R2 = (St-Sr)/St

plt.plot(_X, _Y, 'o', label='Datos originales')
plt.plot(_XR, _Yr, '--', label=r'$y={u[1]:.4f}x+{u[0]:.4f}'+r'$'+'\n'+f'R2={R2:.4f}')

plt.grid()
plt.ylabel('Distancia inicial (mm)')
plt.xlabel(r'$\Delta d$ (mm)')
plt.title(r'Distancia inicial vs $\Delta d$')

plt.legend()
plt.show()
```



```
In [ ]:
df2 = df.dropna()
_X = df2['Volumen de agua (cm³)'].values
_Y = df2['Distancia inicial (mm)'].values

u = (np.linalg.solve(np.array([[len(_X), np.sum(_X)], [
    np.sum(_X), np.sum(_X**2)]]), np.array([[np.sum(_Y), [np.sum(_Y*_X)]]]).T)[0]

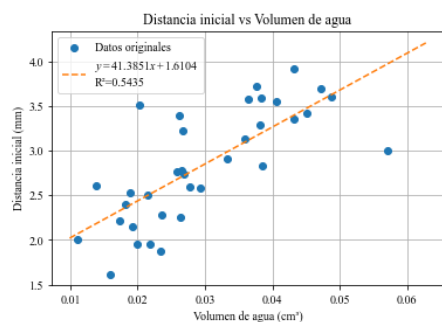
_XR = np.array([np.min(_X)*0.9, np.max(_X)*1.1])
_Yr = u[0]+_XR*u[1]

_Yrr = u[0]+_X*u[1]
Sr = np.sum((_Y - _Yrr)**2)
St = np.sum((_Y - np.average(_Y))**2)
R2 = (St-Sr)/St

plt.plot(_X, _Y, 'o', label='Datos originales')
plt.plot(_XR, _Yr, '--', label=r'$y={u[1]:.4f}x+{u[0]:.4f}'+r'$'+'\n'+f'R2={R2:.4f}')

plt.grid()
plt.xlabel('Volumen de agua (cm³)')
plt.ylabel('Distancia inicial (mm)')
plt.title(r'Distancia inicial vs Volumen de agua')

plt.legend()
plt.show()
```




```
In [ ]: df2 = df.dropna()
_X = df2['Volumen de agua (cm3)'].values
_Y = df2['Delta d'].values

u = (np.linalg.solve(np.array([[len(_X), np.sum(_X)], [
    np.sum(_X), np.sum(_X**2)]]), np.array([[np.sum(_Y)], [np.sum(_Y*_X)]]).T)[0]

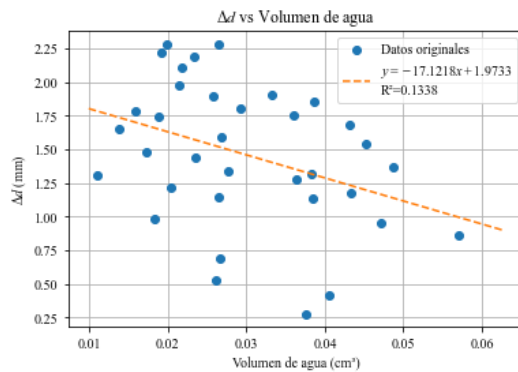
_XR = np.array([np.min(_X)*0.9, np.max(_X)*1.1])
_Yr = u[0]+_XR*u[1]

_Yrr = u[0]+_X*u[1]
Sr = np.sum((_Y - _Yrr)**2)
St = np.sum((_Y - np.average(_Y))**2)
R2 = (St-Sr)/St

plt.plot(_X, _Y, 'o', label='Datos originales')
plt.plot(_XR, _Yr, '--', label=r'$y = \{u[1]\}x + \{u[0]\}$' + '\n' + f'$R^2 = \{R2\}$')

plt.grid()
plt.xlabel('Volumen de agua (cm³)')
plt.ylabel(r'$\Delta d$ (mm)')
plt.title(r'$\Delta d$ vs Volumen de agua')

plt.legend()
plt.show()
```



```
In [ ]: df05 = pd.read_csv('data/v05.csv')
df1 = pd.read_csv('data/v1.csv')
df05.head()
```

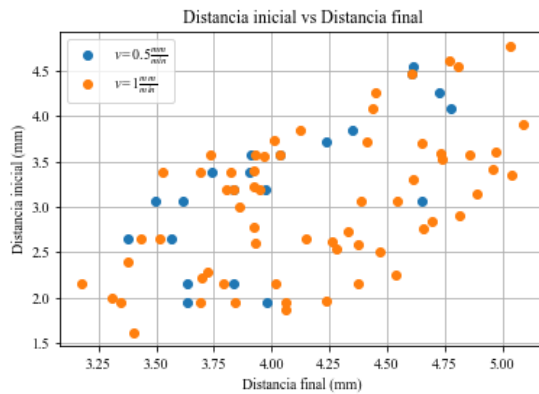
```
Out[ ]:
```

	Fecha	Ensayo	Distancia inicial (mm)	Distancia final (mm)	F-I
0	20210820	1	2.158	3.838	1.680
1	20210820	2	2.158	3.632	1.474
2	20210823	6	1.952	3.637	1.685
3	20210823	7	1.952	3.977	2.025
4	20210823	14	2.643	3.565	0.922

```
In [ ]: _X = df05['Distancia final (mm)'].values
_Y = df05['Distancia inicial (mm)'].values
plt.plot(_X, _Y, 'o', label=r'$v = 0.5 \frac{mm}{min}$')

_X = df1['Distancia final (mm)'].values
_Y = df1['Distancia inicial (mm)'].values
plt.plot(_X, _Y, 'o', label=r'$v = 1 \frac{mm}{min}$')

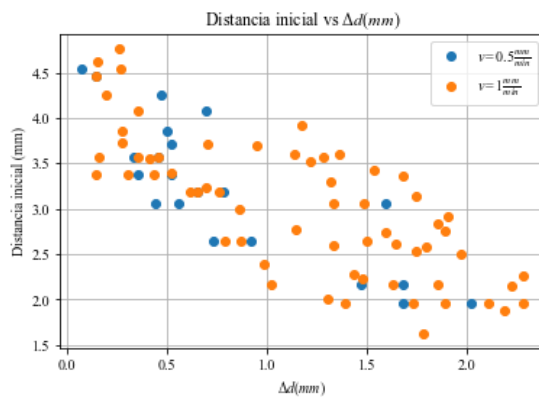
plt.grid()
plt.xlabel('Distancia final (mm)')
plt.ylabel('Distancia inicial (mm)')
plt.title('Distancia inicial vs Distancia final')
plt.legend()
plt.show()
```



```
In [ ]:
_X = df05['F-I'].values
_Y = df05['Distancia inicial (mm)'].values
plt.plot(_X, _Y, 'o', label=r'$v=0.5\frac{mm}{min}$')

_X = df1['F-I'].values
_Y = df1['Distancia inicial (mm)'].values
plt.plot(_X, _Y, 'o', label=r'$v=1\frac{mm}{min}$')

plt.grid()
plt.xlabel(r'$\Delta d$ (mm)')
plt.ylabel('Distancia inicial (mm)')
plt.title(r'Distancia inicial vs $\Delta d$ (mm)')
plt.legend()
plt.show()
```



```
In [ ]:
df = pd.read_csv('data/df1.csv')

rompe = df['Rompe']==1
norompe = df['Rompe']==0

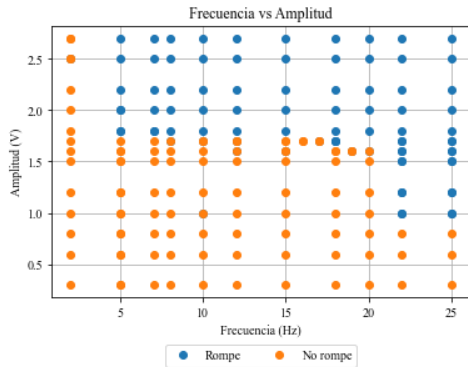
X = df['w (Hz)'].values[rompe]
Y = df['a (Voltios)'].values[rompe]

plt.plot(X,Y,'o',label='Rompe')

X = df['w (Hz)'].values[norompe]
Y = df['a (Voltios)'].values[norompe]

plt.plot(X,Y,'o',label='No rompe')

plt.grid()
plt.xlabel('Frecuencia (Hz)')
plt.ylabel('Amplitud (V)')
plt.title(r'Frecuencia vs Amplitud')
plt.legend(loc='upper center', bbox_to_anchor=(0.5, -0.15),
          fancybox=True, shadow=False, ncol=2)
plt.show()
```



```
In [ ]: df = pd.read_csv('data/df2.csv')
df.head()
```

```
Out[ ]:
```

	Fecha	Ensayo	Ditancia	a (Voltios)	w (Hz)	L/D	Rompe
0	20211111	273	1.762	1.6	2	0.4405	1
1	20211111	274	1.762	1.6	5	0.4405	1
2	20211111	275	1.762	1.6	8	0.4405	1
3	20211111	291	1.762	1.6	25	0.4405	1
4	20211111	292	1.762	1.6	25	0.4405	1

```
In [ ]: rompe = df['Rompe']==1
norompe = df['Rompe']==0

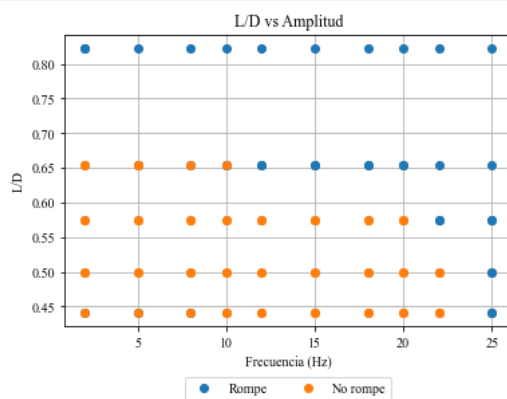
X = df['w (Hz)'].values[rompe]
Y = df['L/D'].values[rompe]

plt.plot(X,Y,'o',label='Rompe')

X = df['w (Hz)'].values[norompe]
Y = df['L/D'].values[norompe]

plt.plot(X,Y,'o',label='No rompe')

plt.grid()
plt.xlabel('Frecuencia (Hz)')
plt.ylabel('L/D')
plt.title(r'L/D vs Amplitud')
plt.legend(loc='upper center', bbox_to_anchor=(0.5, -0.15),
          fancybox=True, shadow=False, ncol=2)
plt.show()
```



Anexo 15. Código de Python para el desarrollo de las gráficas.

```
In [26]: import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib
matplotlib.rcParams.update({'font.family': 'Times New Roman'})

matplotlib.rcParams['mathtext.fontset'] = 'custom'
matplotlib.rcParams['mathtext.rm'] = 'Times New Roman'
matplotlib.rcParams['mathtext.it'] = 'Times New Roman:italic'
matplotlib.rcParams['mathtext.bf'] = 'Times New Roman:bold'

df = pd.read_csv('data/df3.csv')

norompe = df['Rompe']==0
rompe = df['Rompe']==1
siperono = df['Rompe']==2

X = df['w (Hz)'].values[rompe]
Y = df['a (Voltios)'].values[rompe]

plt.plot(X, Y, 'o', label='Rompen')

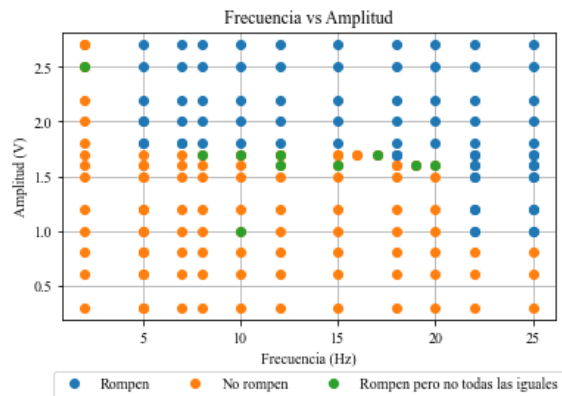
X = df['w (Hz)'].values[norompe]
Y = df['a (Voltios)'].values[norompe]

plt.plot(X, Y, 'o', label='No rompen')

X = df['w (Hz)'].values[siperono]
Y = df['a (Voltios)'].values[siperono]

plt.plot(X,Y,'o',label='Rompen pero no todas las iguales')

plt.grid()
plt.xlabel('Frecuencia (Hz)')
plt.ylabel('Amplitud (V)')
plt.title(r'Frecuencia vs Amplitud')
plt.legend(loc='upper center', bbox_to_anchor=(0.5, -0.15),
          fancybox=True, shadow=False, ncol=3)
plt.subplots_adjust(bottom=0.2)
plt.savefig('figuras/fig7.pdf')
plt.show()
```



Anexo 16. Código de nuevo diagrama de fase de Amplitud vs Frecuencia.