



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

Amortiguamiento no-clásico en estructuras de péndulo invertido

AUTORES:

Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián

Guamán Narváez, Franklin Danilo

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO CIVIL**

TUTOR:

Ing. Barros Cabezas, José Andrés, MSc., Ph. D.

Guayaquil, Ecuador

27 de febrero de 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

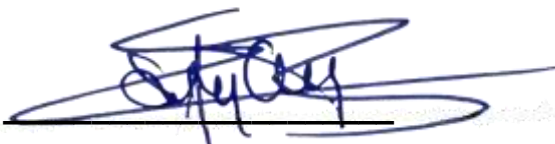
Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián & Guamán Narváez, Franklin Danilo, como requerimiento para la obtención del título de Ingeniero Civil.

TUTOR

f.  _____

Ing. Barros Cabezas, José Andrés, MSc., Ph. D.

DIRECTORA DE LA CARRERA

f.  _____

Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, MSc.

Guayaquil, a los 27 del mes de febrero del año 2026



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián
& Guamán Narváez, Franklin Danilo

DECLARAMOS QUE:

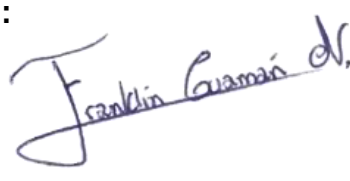
El Trabajo de Titulación, Amortiguamiento no-clásico en estructuras de péndulo invertido, previo a la obtención del título de **Ingeniería Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

Guayaquil, a los 27 del mes de febrero del año 2026

LOS AUTORES:

f. 
Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián

f. 
Guamán Narváez, Franklin Danilo



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

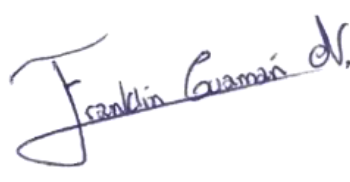
Nosotros, Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián
& Guamán Narvárez, Franklin Danilo

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, Amortiguamiento no-clásico en estructuras de péndulo invertido, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 27 del mes de febrero del año 2026

LOS AUTORES:

f. 
Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián

f. 
Guamán Narvárez, Franklin Danilo



Certificado de análisis

Compilatio Magister+ | UCSG-EC- Universidad Católica de Santiago de Guayaquil

Franklin Guamán_ Andrés Cedeño (1) (2)

ID : cc021ee0dc007247d6a9b7d752655347c08ac818



9%

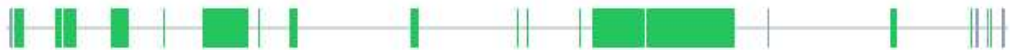
Textos sospechosos

Nombre del fichero : Franklin Guamán_ Andrés Cedeño (1) (2).txt
Tamaño del archivo original : 6,56 MB
Número de palabras : 6572
Número de caracteres : 48984

Depositante : Clara Catalina Glas Cevallos
Fecha de depósito : 3 de marzo de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 3 de marzo de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Similitudes 0%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA 9%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA. Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos 16%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua. Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.



No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :

Textos entre comillas 5%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.



Firmado electrónicamente por:
JOSE ANDRES BARROS CABEZAS
Validar únicamente con FirmatC

f. _____

Ing. Barros Cabezas, José Andrés, MSc., Ph.D.

TUTOR

AGRADECIMIENTO

ANDRÉS CEDEÑO:

Agradezco a Dios por permitirme culminar esta etapa importante de mi vida. Expreso mi gratitud a mi familia por su apoyo constante y a mis docentes por su guía y enseñanza. De manera especial, agradezco a mi tutor, Ing. José Barros por su orientación, dedicación y aporte en el desarrollo de esta investigación.

FRANKLIN GUAMÁN:

En primer lugar, a Dios por ser mi mayor guía en el camino de mi vida.

A mis padres, León Guamán y Carmen Narváez, quienes han sido el pilar más firme ante las adversidades. Gracias por cada sacrificio en silencio, por cada corrección oportuna, por creer en mí, y por brindarme no solo el apoyo económico sino el amor y la fortaleza necesarios para no rendirme. Sus enseñanzas y consejos, sin título ni diploma, fueron las más importantes.

A mi hermano León y su familia, por ser un gran apoyo en la elaboración de este proyecto, por cada momento compartido, y cómo podría olvidarme de María Guamán (mi cuache), mi mejor amiga, quien estuvo presente en cada momento difícil, por ser la persona que me brinda apoyo en cualquier meta que me proponga y por su confianza incondicional.

A mi tutor, Ing. José Barros por su paciencia y orientación para dar forma a este trabajo, por cada duda resuelta y por ser un gran ejemplo como persona.

A todos los docentes de la carrera, especialmente al Ing. Cali y a la Ing. Lida, quienes supieron transmitirme no solo conocimientos sino el valor de una buena charla y una perspectiva más amplia.

A Isabel Naranjo, por su tiempo y compañía durante mi trayectoria y en este último paso. Su apoyo y confianza fueron uno de los principales motivos para lograr este paso, que deseo reconocer con mucho cariño y respeto, valorando cada momento vivido.

A todos los compañeros que conocí en el transcurso, pero con mayor énfasis a Yachimba, Ortega, Alcívar, Argüello, Cedeño y Nimbriotis, por las

horas de estudio compartidas, las complicaciones superadas juntos y por cada pequeño momento que, sumado, hizo grande esta etapa.

A la Universidad Católica, por haberme abierto las puertas y permitirme formarme en un espacio que exige, pero también construye. Hoy entiendo que cada obstáculo fue parte de la preparación.

Y a una persona muy importante para mí, al Ing. Luis Sáenz y esposa, quien desde pequeño fueron un ejemplo a seguir, gracias por todo su apoyo incondicional.

DEDICATORIA

ANDRÉS CEDEÑO:


Dedico este trabajo a mi familia, por su apoyo incondicional, comprensión y motivación constante a lo largo de nuestra formación académica. A mis padres, por ser el pilar fundamental en mi vida y por impulsarme a alcanzar nuevas metas.

FRANKLIN GUAMÁN:

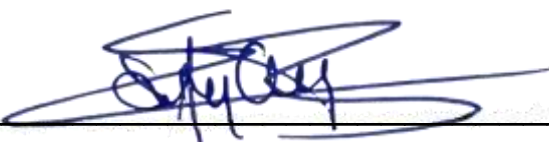
Dios y a la virgen Inmaculada, por ser mi guía ante mis peores momentos, por bendecir a toda mi familia. A mis padres, hermanos y amigos.

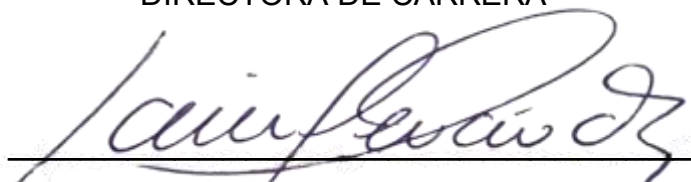



**UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

f. 
Ing. Barros Cabezas, José Andrés, MSc., Ph. D.
TUTOR

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 
Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, MSc.
DIRECTORA DE CARRERA

f. 
Ing. Hernández Barredo, Jaime Francisco, MSc.
COORDINADOR DEL ÁREA

f. 
Ing. Casal Rodríguez, Xavier Federico, MSc.
OPONENTE

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO	VI
DEDICATORIA	VIII
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	IX
ÍNDICE GENERAL	X
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	XI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
RESUMEN Y ABSTRACT	XIV
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	2
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. OBJETIVOS	4
1.2.1. <i>Objetivo General</i>	4
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.3. JUSTIFICACIÓN	5
1.4. MARCO TEÓRICO	5
1.4.1. <i>Modelos existentes de amortiguamiento.</i>	5
1.4.2. <i>Implicación para sistemas tipo péndulo invertido.</i>	7
CAPÍTULO 2: DESARROLLO	7
2.1. METODOLOGÍA	7
2.2. ENSAYOS DE LABORATORIO	7
2.2.1. <i>Mesa sísmica.</i>	8
2.2.2. <i>Equipos de medición.</i>	10
2.2.3. <i>Probetas de ensayo.</i>	12
2.3. MODELACIÓN NUMÉRICA	14
2.3.1. <i>Ecuación diferencial.</i>	14
CAPÍTULO 3: RESULTADOS	16
3.1. MEDICIONES DEL MODELO FÍSICO	16
3.2. RESULTADOS DE MEDICIONES REALIZADAS	22
3.3. RESULTADOS DEL MODELO NUMÉRICO	31
CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	35
4.1. CONCLUSIONES	35
4.2. RECOMENDACIONES	35
REFERENCIAS	36

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1. MESA SÍSMICA UTILIZADA PARA APLICAR EXCITACIÓN UNIDIRECCIONAL.	8
ILUSTRACIÓN 2. PERÍODO DE LA MESA SÍSMICA EN FUNCIÓN DEL NIVEL DEL CONTROLADOR.	9
ILUSTRACIÓN 3. FRECUENCIA FUNDAMENTAL MEDIDA DE LA MESA SÍSMICA EN FUNCIÓN DEL NIVEL DEL CONTROLADOR.....	10
ILUSTRACIÓN 4. SISTEMA DE ACELERÓMETRO EN MASA DE PROBETA.....	11
ILUSTRACIÓN 5. SISTEMA DE ACELERÓMETRO Y SENSOR DE ACTIVACIÓN EN LA MESA.	11
ILUSTRACIÓN 6. LECTURA DE AMBOS MÓDULOS EN ESTADO DE REPOSO CON EL OFFSET AJUSTADO.	12
ILUSTRACIÓN 7. VARILLAS DE ACERO UTILIZADAS COMO PROBETAS (SECCIONES CIRCULAR Y CUADRADA).....	13
ILUSTRACIÓN 8. ESQUEMA DEL SISTEMA DE PÉNDULO INVERTIDO.	14
ILUSTRACIÓN 9. ACELERACIÓN VS TIEMPO DE LA MESA.....	20
ILUSTRACIÓN 10. ACELERACIÓN VS TIEMPO DE LA PROBETA.	21
ILUSTRACIÓN 11. FRECUENCIA Y AMPLITUD DE LA MESA.	21
ILUSTRACIÓN 12. FRECUENCIA Y AMPLITUD DE LA PROBETA.....	22
ILUSTRACIÓN 13. FRECUENCIA FUNDAMENTAL MEDIDA: PROBETAS CON VARILLA CIRCULAR.....	22
ILUSTRACIÓN 14. FRECUENCIA FUNDAMENTAL MEDIDA: PROBETAS CON VARILLA CUADRADA.	23
ILUSTRACIÓN 15. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L0.5_Phi12.	24
ILUSTRACIÓN 16. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L0.5_Phi14.	24
ILUSTRACIÓN 17. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L0.5_Phi18.	25
ILUSTRACIÓN 18. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L0.75_Phi12.	25
ILUSTRACIÓN 19. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L0.75_Phi14.	26
ILUSTRACIÓN 20. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L0.75_Phi18.	26
ILUSTRACIÓN 21. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L1.0_Phi12.	27
ILUSTRACIÓN 22. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L1.0_Phi14.	27
ILUSTRACIÓN 23. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – CUADRADA_L1.0_Phi18.	28

ILUSTRACIÓN 24. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – LISA_L0.5_PHI14.....	28
ILUSTRACIÓN 25. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – LISA_L0.5_PHI18.....	29
ILUSTRACIÓN 26. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – LISA_L0.75_PHI14.....	29
ILUSTRACIÓN 27. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – LISA_L0.75_PHI18.....	30
ILUSTRACIÓN 28. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – LISA_L1.0_PHI14.....	30
ILUSTRACIÓN 29. ESTIMACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO (COULOMB) – LISA_L1.0_PHI18.....	31
ILUSTRACIÓN 30. RELACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE CON LA LONGITUD DE VARILLA EN PROBETAS DE SECCIÓN CIRCULAR.....	31
ILUSTRACIÓN 31. RELACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE CON LA LONGITUD DE VARILLA EN PROBETAS DE SECCIÓN CUADRADA.....	32
ILUSTRACIÓN 32. RELACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE CON EL DIÁMETRO EN PROBETAS DE SECCIÓN CIRCULAR.	33
ILUSTRACIÓN 33. RELACIÓN DEL AMORTIGUAMIENTO EQUIVALENTE CON EL DIÁMETRO EN PROBETAS DE SECCIÓN CUADRADA.	33
ILUSTRACIÓN 34. COMPARACIÓN DE ACELERACIÓN DE LA PROBETA: MODELO EXPERIMENTAL VS MODELO TEÓRICO NO-CLÁSICO.	34

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: MATRIZ DE PROBETAS FABRICADAS POR LONGITUD Y DIÁMETRO.....	13
TABLA 2. PARÁMETROS CALIBRADOS DE AMORTIGUAMIENTO.	34

RESUMEN

La presente investigación estima la influencia de la altura, inercia y frecuencia de carga en el amortiguamiento de estructuras de acero de tipo péndulo invertido de un grado de libertad, mediante ensayos de laboratorio y calibración de modelos numéricos, para establecer los coeficientes de amortiguamiento no-clásico de este tipo de estructuras. La metodología se dividió en tres etapas: ensayos experimentales, procesamiento de señales y modelación numérica y calibración para reproducir la respuesta observada. Los ensayos se realizaron con la mesa sísmica del Laboratorio de Aguas como excitación dinámica controlada, aplicando una entrada unidireccional en el eje X; debido a que el equipo opera con un controlador de 10 niveles, se lo caracterizó para asociar cada nivel con la frecuencia efectiva medida. La instrumentación empleó un sistema de adquisición basado en ESP32 y acelerómetros MPU-6050, instalados en la mesa para registrar la aceleración de entrada y en la masa superior de la probeta para registrar su respuesta. Con los registros se determinó la frecuencia fundamental de cada configuración de varilla (sección cuadrada y circular) y, posteriormente, se estimó un amortiguamiento equivalente a partir de respuestas libres, adoptando el modelo de fricción de Coulomb por presentar pérdidas por rozamiento. Como apoyo al ajuste de parámetros, se consideró la calibración bayesiana para actualizar el modelo a partir de datos experimentales. Los resultados muestran que la mesa sísmica presenta limitaciones para excitar ciertas probetas hasta condiciones cercanas a resonancia.

PALABRAS CLAVE: Amortiguamiento no clásico, Péndulo invertido, Mesa sísmica, Calibración, Frecuencia fundamental, Fourier.

ABSTRACT

This research estimates the influence of height, inertia, and loading frequency on the damping of single-degree-of-freedom inverted-pendulum-type steel structures through laboratory testing and numerical-model calibration, with the aim of determining the non-classical damping coefficients for this type of structure. The methodology was divided into three stages: experimental testing, signal processing, and numerical modeling and calibration to reproduce the observed response. Tests were performed using the Water Laboratory shake table as a controlled dynamic excitation, applying a unidirectional input along the X axis; because the table operates with a 10-level controller, it was characterized to associate each level with the effectively measured frequency. Instrumentation used an ESP32-based acquisition system with MPU-6050 accelerometers, installed on the table to record input acceleration and on the specimen's top mass to record its response.

From the records, the fundamental frequency of each rod configuration (square and circular sections) was determined and, subsequently, an equivalent damping was estimated from free-decay responses, adopting the Coulomb friction model due to friction-related losses.

To support parameter fitting, Bayesian calibration was considered to update the model from experimental data. Results show that the shake table has limitations to excite certain specimens up to near-resonance conditions.

KEYWORDS: Non-classical damping; Inverted pendulum; Shake table; Calibration; Fundamental frequency; Fourier.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El análisis estructural moderno se apoya en modelos numéricos capaces de aproximar el comportamiento de una estructura frente a distintos tipos de carga, en particular las acciones sísmicas. Estas herramientas han transformado la práctica de la ingeniería civil porque reducen la dependencia de ensayos físicos costosos y, aun así, permiten estimar con precisión la respuesta estructural. Sin embargo, la precisión de un modelo numérico depende directamente de la coherencia entre sus parámetros constitutivos y las condiciones físicas reales del sistema estructural (Qu et al., 2024).

Los métodos de análisis utilizados hoy en día suelen partir de valores simplificados, como el comportamiento elástico de los materiales y la distribución uniforme de las propiedades estructurales. Esas idealizaciones facilitan el cálculo y mejoran la estabilidad numérica, pero inevitablemente conllevan un margen de error frente a respuestas medidas en laboratorio o en estructuras reales. Por eso, la literatura reciente insiste en la validación cuantitativa y sistemática de los modelos, con el objetivo de reducir el error asociado a hipótesis idealizadas y garantizar respuestas que realmente representen al sistema físico (Chen et al., 2024).

En dinámica estructural, masa y rigidez se integran en formulaciones que reproducen la respuesta ante cargas variables en el tiempo. Aun así, que un algoritmo sea estable no significa que sea preciso: el paso de integración, la discretización y, sobre todo, la forma en que se representa el amortiguamiento influye de manera directa en las amplitudes, fases y duraciones de la vibración estimada (Lu et al., 2017). En esa línea, también se ha reportado que la incertidumbre asociada al modelo de amortiguamiento puede ser tan relevante como la variabilidad de parámetros estructurales, lo que refuerza la necesidad de calibración y control del modelo dentro del análisis dinámico (Ghahari et al., 2024).

Conforme el análisis estructural ha avanzado hacia sistemas más complejos, los modelos lineales han mostrado limitaciones para describir

fenómenos no elásticos o con grandes desplazamientos. Las formulaciones no lineales permiten representar con mayor confianza rigideces variables, efectos geométricos y mecanismos reales de disipación de energía, aportando una base más racional para análisis y diseño cuando la respuesta depende del estado de daño o de la amplitud de vibración (Takewaki & Akehashi, 2021).

En este contexto, el amortiguamiento es un componente determinante en la caracterización de la respuesta dinámica. Su representación adecuada mejora la estimación de amplitudes, duraciones y fases de vibración. El modelo de Rayleigh, basado en una combinación proporcional de las matrices de masa y rigidez, sigue siendo ampliamente aplicado por su simplicidad y estabilidad numérica. No obstante, se ha demostrado que la elección de sus parámetros puede inducir disipación modal no representativa y distorsionar la respuesta dinámica si no existe un criterio de calibración consistente (Chen et al., 2024). Al mismo tiempo, se reconoce que muchos sistemas reales presentan amortiguamiento no proporcional, con disipación que no se distribuye uniformemente, lo que exige formulaciones más generales para describir la interacción modal y los efectos disipativos reales (Sun et al., 2024).

Adicionalmente, la modelación estructural ha incorporado métodos de inferencia probabilística para reducir la incertidumbre en la estimación de parámetros y apoyar la selección de modelos. En particular, los enfoques bayesianos permiten actualizar modelos a partir de datos experimentales, integrando información previa con mediciones reales para obtener parámetros más representativos del sistema físico (Barros et al., 2022).

En síntesis, la selección y calibración del modelo de amortiguamiento es un punto crítico para lograr coherencia entre resultados numéricos y respuesta observada. Sin embargo, la modelación del amortiguamiento no clásico sigue siendo un desafío vigente, especialmente en sistemas con no linealidades geométricas y mecanismos disipativos combinados.

En este sentido, la presente investigación se orienta a analizar y caracterizar el comportamiento dinámico de estructuras de péndulo invertido bajo esquemas de amortiguamiento no clásico, con el propósito de contribuir

al desarrollo de modelos numéricos más representativos que estimen de forma integral los mecanismos de disipación de energía en este tipo de sistemas.

El desarrollo de la tesis se organiza en cuatro capítulos. El Capítulo 2 describe la metodología adoptada: ensayos experimentales, instrumentación, procesamiento de datos, modelación numérica, formulación de la ecuación diferencial y el enfoque de calibración. El Capítulo 3 presenta los resultados, diferenciando entre los obtenidos experimentalmente y aquellos derivados de simulación con los esquemas de ajuste implementados. Finalmente, el Capítulo 4 expone conclusiones y recomendaciones relacionadas con la representación del amortiguamiento no clásico en sistemas estructurales complejos.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

Estimar la influencia de la altura, inercia y frecuencia de carga en el amortiguamiento de estructuras de acero de tipo péndulo invertido de un grado de libertad, mediante ensayos de laboratorio y calibración de modelos numéricos, para establecer los coeficientes de amortiguamiento no-clásico de este tipo de estructuras.

1.2.2. Objetivos Específicos

- a) Elaborar un sistema de medición de aceleraciones usando dispositivos de bajo costo (Arduino o similar).
- b) Caracterizar el movimiento de la mesa sísmica de la facultad de ingeniería de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, por medio de mediciones de desplazamiento y aceleración.
- c) Realizar ensayos de laboratorio de varios especímenes de estructuras de péndulo invertido de un grado de libertad, usando la mesa sísmica.
- d) Calibrar los valores de amortiguamiento en base a los resultados de los ensayos, usando un modelo numérico.

- e) Establecer ecuaciones de los valores de amortiguamiento en función de los parámetros de estudio (altura, inercia y frecuencia de carga).

1.3. Justificación

El diseño estructural mediante metodologías convencionales ha demostrado ser efectivo en la práctica de la ingeniería; sin embargo, la caracterización del amortiguamiento no-clásico en sistemas de péndulo invertido sigue limitada a aproximaciones teóricas y valores empíricos generales, sin evidencia experimental que respalde completamente su comportamiento dinámico. Los códigos de diseño actuales emplean coeficientes de amortiguamiento definidos para tipologías convencionales, los cuales, aunque funcionales, no contemplan las variables principales que afectan al sistema, como la influencia de la altura, la inercia y la frecuencia de carga. Esta limitación, si bien garantiza seguridad, restringe la eficiencia y precisión en el diseño estructural. La presente investigación propone una caracterización experimental mediante el uso de la mesa sísmica de la UCSG y dispositivos de medición accesibles, con el fin de obtener coeficientes de amortiguamiento representativos y ajustados al comportamiento de estos sistemas. De esta forma, se busca mejorar la comprensión del comportamiento dinámico de las estructuras.

1.4. Marco teórico

1.4.1. Modelos existentes de amortiguamiento.

1.4.1.1. Amortiguamiento estructural en dinámica de estructuras

El amortiguamiento estructural describe la disipación de energía durante la vibración, asociada a mecanismos internos del material, interacción entre componentes y fricción en conexiones. En la práctica se representa mediante modelos equivalentes que simplifican procesos físicos complejos, pero que son necesarios para predecir respuestas dinámicas de manera realista (Qu et al., 2024).

1.4.1.2. Amortiguamiento viscoso lineal

En el modelo viscoso lineal, la fuerza disipativa es proporcional a la velocidad relativa. Su forma típica se expresa como:

$$F_c = c \dot{X} \quad (1)$$

Su ventaja principal es la facilidad de implementación en integración numérica y análisis modal, aunque su aplicabilidad disminuye cuando la disipación real no depende linealmente de la velocidad o cuando el sistema presenta no linealidades importantes (Lu et al., 2017).

1.4.1.3. Modelo de Rayleigh

El amortiguamiento de Rayleigh plantea una matriz de amortiguamiento proporcional a la masa y a la rigidez:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (2)$$

Esto permite controlar la disipación modal con dos parámetros y es ampliamente compatible con los softwares actuales de análisis. Aun así, se ha reportado que una elección inadecuada de α y β puede producir amortiguamientos modales no representativos y respuestas globales distorsionadas, sobre todo fuera del rango de frecuencias usado para definirlos (Chen et al., 2024; Ghahari et al., 2024).

1.4.1.4. Amortiguamiento por fricción (Coulomb)

El amortiguamiento por fricción representa disipación por rozamiento seco entre superficies en contacto. Un modelo idealizado se expresa como:

$$F_f = \mu N \text{sign}(\dot{x}) \quad (3)$$

Este tipo de disipación captura adecuadamente la respuesta de conexiones y dispositivos mecánicos de fricción, permitiendo modelar la

disipación incluso cuando la velocidad relativa es baja. En la práctica, suele regularizarse con aproximaciones continuas para mejorar estabilidad computacional (Pennestri et al., 2016).

1.4.1.5. Modelos viscoelásticos y dependientes de frecuencia

Los modelos viscoelásticos representan materiales cuya respuesta depende de deformación y velocidad, introduciendo comportamientos dependientes de la frecuencia y temperatura. Esto resulta especialmente útil cuando la disipación real no es constante en todo el rango dinámico. La literatura también ha señalado que la representación causal y físicamente consistente de modelos histeréticos y dependientes de frecuencia es clave para análisis en el dominio del tiempo (Sun et al., 2024).

1.4.2. Implicación para sistemas tipo péndulo invertido

En sistemas tipo péndulo invertido se combinan grandes desplazamientos, inestabilidad geométrica y disipación no uniforme de la energía. En este contexto, la selección del modelo de amortiguamiento influye directamente en la respuesta estimada, y suele ser más realista trabajar con formulaciones no lineales o no proporcionales cuando los mecanismos disipativos lo exigen (Takewaki & Akehashi, 2021).

CAPÍTULO 2: DESARROLLO

2.1. Metodología.

La metodología se dividió en tres etapas: ensayos experimentales, donde se aplicó una excitación controlada en la base y se registró la respuesta del sistema, posterior se realizó el procesamiento de señales, para obtener registros comparables y parámetros dinámicos representativos, por último, modelación numérica y calibración, donde se ajustaron los parámetros de amortiguamiento del modelo para reproducir la respuesta observada.

2.2. Ensayos de Laboratorio.

2.2.1. Mesa sísmica.

Los ensayos se realizaron utilizando la mesa sísmica del Laboratorio de Aguas de la Facultad de Ingeniería como fuente de excitación dinámica controlada (ver Ilustración 1). En esta investigación, la excitación se aplicó de forma unidireccional en el eje de desplazamiento X , con el propósito de evaluar la respuesta de un sistema tipo péndulo invertido bajo una entrada base en un solo grado de libertad, y comparar la señal registrada en la base con la respuesta medida en la masa de la probeta. La mesa dispone de un controlador con 10 niveles de operación, los cuales corresponden a valores relativos de mando del equipo, en la práctica, al incrementar el nivel del controlador se incrementa la frecuencia fundamental inducida en la mesa, aunque esta relación no es completamente lineal. Por esta razón, se realizó una caracterización de la mesa, realizando lecturas para cada nivel del controlador y obteniendo la frecuencia efectiva medida a partir de los registros de aceleración. Con base en dicha caracterización, cada probeta fue ensayada recorriendo los niveles de menor a mayor, con el fin de analizar su comportamiento bajo diferentes condiciones de excitación.



Ilustración 1. Mesa sísmica utilizada para aplicar excitación unidireccional.

El gráfico de período de la mesa sísmica (ver Ilustración 2), muestra el comportamiento inverso esperado, al aumentar la frecuencia, el período disminuye, ya que el tiempo requerido para completar un ciclo se reduce conforme la mesa vibra más rápido. Este análisis permite asociar cada nivel de operación del controlador con una condición de excitación definida.

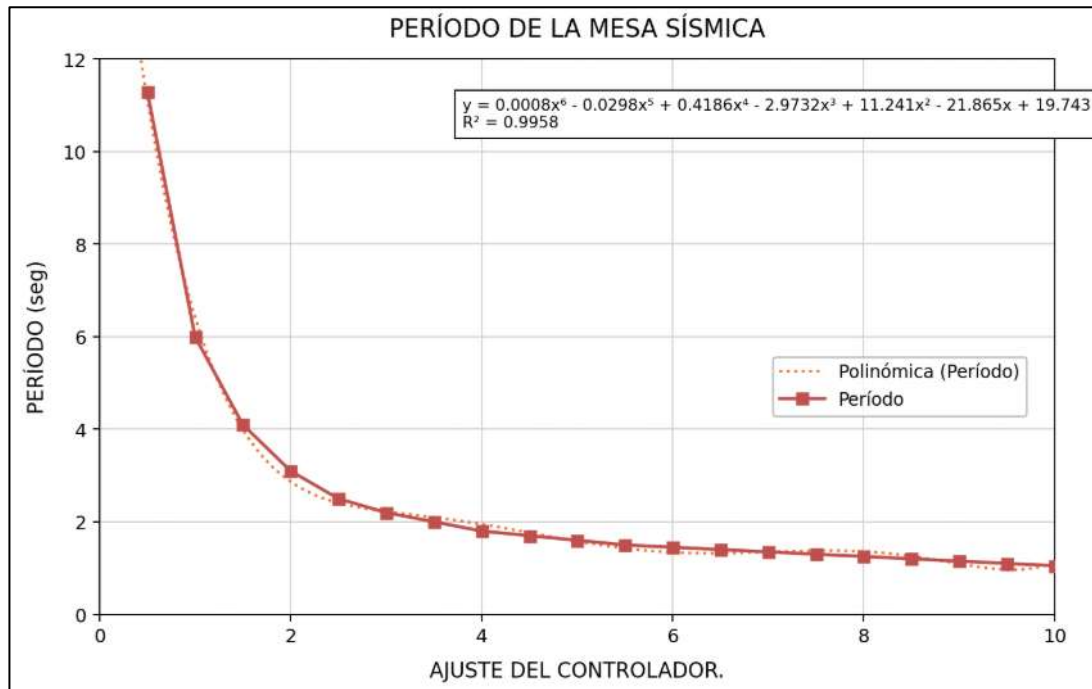


Ilustración 2. Período de la mesa sísmica en función del nivel del controlador.

El gráfico de frecuencia de la mesa (ver Ilustración 3), presenta la caracterización del comportamiento de la mesa sísmica utilizada para aplicar la excitación en la base de las probetas. El controlador de la mesa opera mediante 10 niveles de acción que representan valores relativos de funcionamiento, al aumentar el nivel se incrementa la frecuencia de vibración, es decir, la mesa oscila más rápido. Esto permite observar una tendencia creciente, aunque no perfectamente lineal, lo que indica que cada incremento del controlador no produce exactamente el mismo aumento de frecuencia en todo el rango de acción del controlador.

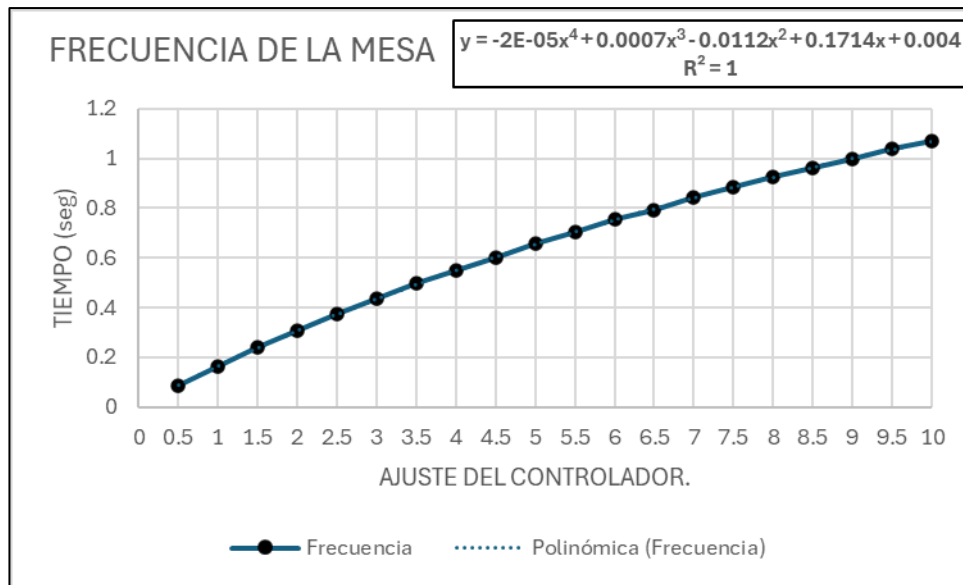


Ilustración 3. Frecuencia fundamental medida de la mesa sísmica en función del nivel del controlador.

2.2.2. Equipos de medición.

Se empleó un sistema de medición basado en un microcontrolador ESP32 y sensores MPU-6050 (acelerómetros), utilizados de forma simultánea en dos puntos clave del ensayo:

- Un sensor colocado sobre la mesa sísmica para registrar la aceleración de entrada (ver Ilustración 5).
- Un sensor ubicado en la masa superior de la probeta para registrar la respuesta del sistema (ver Ilustración 4).

Esta configuración permite comparar directamente la señal de entrada obtenida de la excitación de la mesa sísmica que se le aplica al sistema con la respuesta obtenida en la masa de la probeta, evitando interpretaciones basadas solo en una medición aislada.

La adquisición de datos se diseñó para registrar ambas señales en el mismo intervalo de tiempo, garantizando sincronía entre entrada y respuesta.

Antes de cada ensayo se realizó una calibración de cero en reposo, la cual se resta posteriormente para obtener señales centradas y reducir la distorsión de datos asociados a la medición. Además, el inicio de la lectura realizada en los ensayos se controló mediante una señal enviada al

acelerómetro a partir de un sensor instalado en la base de la mesa sísmica (ver Ilustración 5), de modo que el sistema comienza a guardar datos de ambos módulos de manera simultánea en el momento definido por el operador.



Ilustración 4. Sistema de acelerómetro en masa de probeta.



Ilustración 5. Sistema de acelerómetro y sensor de activación en la mesa.

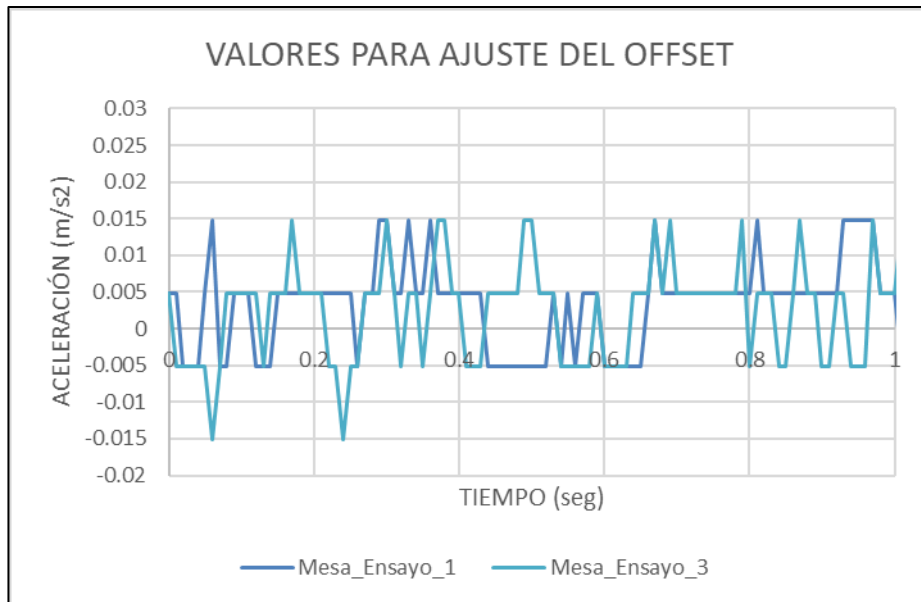


Ilustración 6. Lectura de ambos módulos en estado de reposo con el offset ajustado.

2.2.3. Probetas de ensayo.

Las probetas consisten en varillas lisas de acero, de sección circular y cuadrada (ver Ilustración 7), empotradas en la base y con una masa concentrada de 1 kg soldada en el extremo superior. En la Tabla 1 se muestran las variaciones en los parámetros geométricos donde se consideraron diferentes longitudes y diámetros, además de la variación de la geometría de la sección transversal. Para cada combinación geométrica se fabricaron tres especímenes idénticos, con el fin de contar con repeticiones experimentales y reducir el efecto de dispersión en los resultados.

En términos del objetivo del estudio, estas variaciones permiten modificar dos aspectos del sistema a evaluar en los ensayos, la altura del péndulo invertido y la inercia de la varilla. Al mantener constante la masa superior y controlar la excitación en la base mediante diferentes niveles del controlador de la mesa, podemos observar cómo cambia la respuesta dinámica del sistema, y cómo esos cambios se reflejan en los parámetros de amortiguamiento calibrados.

Tabla 1: Matriz de probetas fabricadas por longitud y diámetro.

Varillas circulares			
Diámetro/Longitud	φ 12	φ 14	φ 18
0.50 m	3 U	3 U	3 U
0.75 m	3 U	3 U	3 U
1.00 m	3 U	3 U	3 U
Cantidad varillas circulares			27 U
Varillas cuadradas			
Diámetro/Longitud	φ 12	φ 14	φ 18
0.50 m	3 U	3 U	3 U
0.75 m	3 U	3 U	3 U
1.00 m	3 U	3 U	3 U
Cantidad varillas cuadrada			27 U
Total de varillas ensayadas			54 U



Ilustración 7. Varillas de acero utilizadas como probetas (secciones circular y cuadrada).

2.3. Modelación numérica

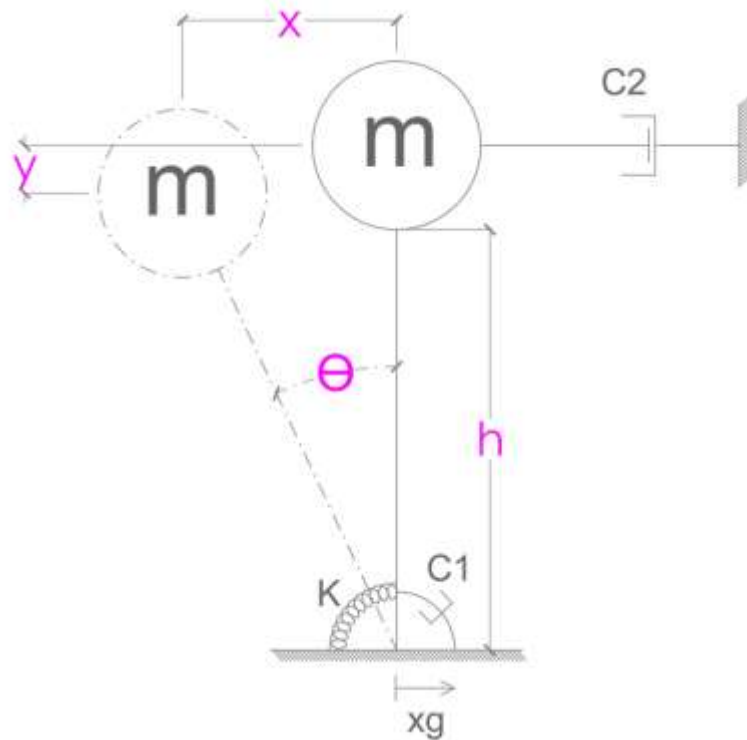


Ilustración 8. Esquema del sistema de péndulo invertido.

2.3.1. Ecuación diferencial.

La ecuación diferencial que describe el movimiento rotacional $\theta(t)$ de un sistema tipo péndulo invertido excitado en la base por el desplazamiento $x_g(t)$ (ver Ilustración 8), tiene la siguiente forma.

Forma general:

$$m h^2 \ddot{\theta}(t) + C_1 \dot{\theta}(t) \tanh(f \dot{\theta}(t)) + C_2 \dot{x}_g(t) + C_2 h \cos(\theta(t)) \dot{\theta}(t) + (k \theta(t) - h m g \sin(\theta(t))) = h m \cos(\theta(t)) \ddot{x}_g(t) \quad (4)$$

Donde "m" es masa concentrada, "h" es la altura efectiva de la probeta, " θ " es el desplazamiento angular de la probeta, mientras que, " $\dot{\theta}(t)$ " y " $\ddot{\theta}(t)$ " son la velocidad y la aceleración angulares respectivamente, " x_g " es la excitación generada en la base, mientras que, " $\dot{x}_g(t)$ " y " $\ddot{x}_g(t)$ " corresponden a la velocidad y aceleración en la base, " C_1 " representa el coeficiente de

amortiguamiento no lineal asociado al empotramiento, " C_2 " es el coeficiente de amortiguamiento lateral estimado en la masa, " k " es la rigidez equivalente del sistema, " g " es la aceleración de la gravedad.

La excitación en la base en condiciones óptimas se podría simplificar como:

$$\begin{aligned}x_g(t) &= b \sin(\omega t) \\ \dot{x}_g(t) &= b \omega \cos(\omega t) \\ \ddot{x}_g(t) &= -b \omega^2 \sin(\omega t)\end{aligned}\tag{5}$$

Donde " b " es la amplitud de la excitación en la base, " ω " es la frecuencia angular de excitación.

Sustituyendo la excitación en la ecuación general se obtiene la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}m h^2 \ddot{\theta}(t) + C_1 \dot{\theta}(t) \tanh(f \dot{\theta}(t)) + C_2 b \omega \cos(\omega t) + C_2 h \cos(\theta(t)) \dot{\theta}(t) \\ + (k \theta(t) - h m g \sin(\theta(t))) = -h m b \omega^2 \cos(\theta(t)) \sin(\omega t)\end{aligned}\tag{6}$$

Rigidez equivalente:

$$k = 3 E I / L^3\tag{7}$$

Donde " E " es el módulo de elasticidad del material, " I " es el momento de inercia de la sección transversal de la varilla y " L " es la longitud de la varilla.

- $m h^2 \ddot{\theta}(t)$: Representa la inercia rotacional equivalente del sistema respecto al empotramiento. Aquí m es la masa concentrada en el extremo superior y a es la longitud efectiva, por lo que $m h^2$ actúa como un momento de inercia concentrado.
- $k \theta(t)$: Corresponde a la rigidez rotacional equivalente asociada a la flexión de la varilla. En el modelo se adopta una rigidez equivalente tipo resorte que tiende a regresar a su posición de equilibrio. Esta rigidez depende de las propiedades geométricas y del material del elemento.

- $hm g \sin \theta(t)$: Es el efecto de la gravedad sobre la masa. Al tratarse de un sistema tipo péndulo invertido, este término puede actuar como un componente que tiende a aumentar la desviación angular cuando el sistema se separa de la vertical, por lo que influye en la frecuencia efectiva del movimiento.
- $C_1 \dot{\theta}(t) \tanh(f \dot{\theta}(t))$: Representa un mecanismo de amortiguamiento no lineal asociado a la disipación en la zona de empotramiento. La función $\tanh(\cdot)$ se utiliza para capturar una disipación que no crece linealmente para cualquier velocidad, sino que tiende a saturarse a velocidades mayores.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1. Mediciones del modelo físico.

Para registrar la excitación aplicada en la base y la respuesta de la probeta se empleó un sistema de adquisición basado en dos módulos ESP32, cada uno conectado a un acelerómetro, comunicados con el computador mediante puertos seriales independientes. El muestreo se definió con un intervalo constante $DT = 0.01 \text{ s}$, equivalente a una frecuencia de muestreo de 100 Hz, lo cual permite obtener registros con resolución suficiente para identificar la frecuencia dominante de la excitación y la respuesta. El tiempo de medición se ingresa desde consola, empleándose por defecto 60 s, lo que genera aproximadamente 6000 muestras por ensayo.

Antes de iniciar, el programa realiza una corrección de los datos mediante un offset que es una lectura en reposo de 3s en cada acelerómetro. Este offset se calcula como el promedio de las muestras registradas con el sistema estático y luego se resta a los datos adquiridos durante el ensayo, con el objetivo de trabajar con señales centradas y comparables.

El inicio de cada registro se controla mediante un gatillo de sincronización, el programa monitorea continuamente ambos puertos y espera la señal del sensor proveniente del módulo asociado a la mesa. En el instante en que se detecta dicha señal, comienza el almacenamiento de datos. Para cada condición de ensayo se ejecutaron tres repeticiones, reiniciando los buffers de lectura serial antes de cada captura para evitar arrastres de datos.

Para el desarrollo del script en Python se empleó asistencia de inteligencia artificial como apoyo técnico en la generación de bloques de código y sugerencias de mejora. La versión final fue revisada y validada por los autores, asegurando su coherencia con la metodología de ensayo aplicada tal como se observa en el algoritmo 1.

Algoritmo 1: Programa elaborado en Python para lectura y registro de ensayos junto con las funciones de la transformada de Fourier de las señales medidas.

```

4. # -- coding: utf-8 --
5. import serial, time, pandas as pd, re, numpy as np, os
6.
7. # Config
8. PUERTO_MESA, PUERTO_PROBETA, BAUDRATE, DT = 'COM4', 'COM8',
    115200, 0.01
9. RUTA_BASE = r"C:\Users\leong\OneDrive - UNIVERSIDAD AGRARIA DEL
    ECUADOR\Escritorio\OneDrive - Universidad Catolica Santiago de
    Guayaquil\I. UCSG\SEMESTRES\TITULACION_B2025\HOJAS DE CÁLCULO"
10. ARCHIVO_OFFSETS = os.path.join(RUTA_BASE, "offsets.txt")
11.
12. def leer_serial(ser, filtro_regex=r'-?\d+\.\?\d*', excluir="Estado
    pin", duracion=None):
13.     """Lee valores numéricos del puerto serial"""
14.     valores, t_inicio = [], time.time()
15.     while not duracion or (time.time() - t_inicio < duracion):
16.         if ser.in_waiting > 0:
17.             linea =
    ser.readline().decode(errors='ignore').strip()
18.             if excluir not in linea and linea:
19.                 match = re.search(filtro_regex, linea)
20.                 if match:
21.                     valores.append(float(match.group()))
22.                     if not duracion: return valores[-1] #
    Retorna inmediatamente si no hay duración
23.             if duracion: time.sleep(DT)
24.             else: break
25.     return sum(valores) / len(valores) if valores else 0
26.
27. def calibrar_cero(ser, duracion=3):
28.     print(f"Calibrando {ser.port}...")
29.     offset = leer_serial(ser, duracion=duracion)
30.     print(f"{ser.port}: offset = {offset:.2f}")
31.     return offset
32.
33. def gestionar_offsets(ser_mesa, ser_probeta, calcular_nuevo):
34.     if not calcular_nuevo and os.path.exists(ARCHIVO_OFFSETS):
35.         with open(ARCHIVO_OFFSETS, 'r') as f:
36.             datos = {linea.split(":")[0]:
    float(linea.split(":")[1]) for linea in f if ":" in linea}
37.             if "Mesa" in datos and "Probeta" in datos:
38.                 print(f"Offsets: Mesa={datos['Mesa']:.2f},
    Probeta={datos['Probeta']:.2f}")
39.             return datos["Mesa"], datos["Probeta"]
40.     offset_mesa, offset_probeta = calibrar_cero(ser_mesa, 3),
    calibrar_cero(ser_probeta, 3)
41.     with open(ARCHIVO_OFFSETS, 'w') as f:

```

```

42.         f.write(f"Mesa: {offset_mesa:.2f}\nProbeta:
{offset_probeta:.2f}\n")
43.         return offset_mesa, offset_probeta
44.
45. def adquirir_datos (ser_mesa, ser_probeta, off_mesa, off_probeta,
n_muestras, ensayo):
46.     print(f"Esperando pin:0 ensayo {ensayo}...")
47.     guardando, datos = False, {'t': [], 'm': [], 'p': []}
48.     ultimo_probeta = 0
49.
50.     while len(datos['t']) < n_muestras:
51.         if ser_mesa.in_waiting:
52.             linea =
ser_mesa.readline().decode(errors='ignore').strip()
53.             if not guardando and "Estado pin: 0" in linea:
54.                 guardando = True
55.                 print("✓ Guardando...")
56.                 continue
57.             if guardando and "Estado pin" not in linea and linea:
58.                 match = re.search(r'-?\d+\.\?\d*', linea)
59.                 if match:
60.                     datos['m'].append(float(match.group()) -
off_mesa)
61.                     datos['t'].append(len(datos['t']) * DT)
62.                     datos['p'].append(ultimo_probeta)
63.                     if len(datos['t']) % 100 == 0:
64.                         print(f"{len(datos['t'])}/{n_muestras}
({len(datos['t'])/n_muestras*100:.1f}%)")
65.                     if ser_probeta.in_waiting:
66.                         linea =
ser_probeta.readline().decode(errors='ignore').strip()
67.                         if "Estado pin" not in linea and linea:
68.                             match = re.search(r'-?\d+\.\?\d*', linea)
69.                             if match: ultimo_probeta = float(match.group()) -
off_probeta
70.                             time.sleep(0.0001)
71.                     return datos
72.
73. def calcular_fft(data, dt):
74.     """Calcula FFT de una señal"""
75.     data = np.array(data) - np.mean(data)
76.     N = len(data)
77.     fft = np.abs(np.fft.fft(data)) * 2 / N
78.     freq = np.fft.fftfreq(N, dt)
79.     fft_pos, freq_pos = fft[:N//2], freq[:N//2]
80.     idx_max = np.argmax(fft_pos)
81.     return freq_pos, fft_pos, freq_pos[idx_max], fft_pos[idx_max]
82.
83. # Main
84. print("Conectando...")
85. ser_mesa = serial.Serial(PUERTO_MESA, BAUDRATE, timeout=1)
86. ser_probeta = serial.Serial(PUERTO_PROBETA, BAUDRATE, timeout=1)
87. time.sleep(2)
88.
89. try:
90.     # Offsets
91.     off_mesa, off_probeta = gestionar_offsets(ser_mesa,
ser_probeta, input("¿Nuevos offsets (1) o guardados (2)?
").strip() == "1")
92.
93.     # Tiempo

```

```

94.     t_medicion = float(input("Tiempo medición (Enter=60s):
    ").strip() or 60)
95.     n_muestras = int(t_medicion / DT)
96.
97.     # Ensayos
98.     ensayos = []
99.     for i in range(1, 4):
100.         print(f"\n{' '*60}\nENSAYO {i}\n{' '*60}")
101.         input("Enter para iniciar...")
102.         ser_mesa.reset_input_buffer()
103.         ser_probeta.reset_input_buffer()
104.         datos = adquirir_datos(ser_mesa, ser_probeta,
    off_mesa, off_probeta, n_muestras, i)
105.         ensayos.append(datos)
106.         print(f"✓ Completado ({len(datos['m'])} muestras)")
107.
108.         # FFT
109.         print("\n" + "="*80 + "\nFFT\n" + "="*80)
110.         ffts = []
111.         for i, e in enumerate(ensayos, 1):
112.             freq_m, fft_m, fmax_m, amax_m = calcular_fft(e['m'],
    DT)
113.             freq_p, fft_p, fmax_p, amax_p = calcular_fft(e['p'],
    DT)
114.             ffts.append({'freq': freq_m, 'fft_m': fft_m,
    'fmax_m': fmax_m, 'amax_m': amax_m,
115.             'fft_p': fft_p, 'fmax_p': fmax_p,
    'amax_p': amax_p})
116.             print(f"E{i}: Mesa {fmax_m:.2f}Hz, Probeta
    {fmax_p:.2f}Hz")
117.
118.             # Promedios
119.             freq_ref = ffts[0]['freq']
120.             fft_m_prom = np.mean([f['fft_m'] for f in ffts], axis=0)
121.             fft_p_prom = np.mean([f['fft_p'] for f in ffts], axis=0)
122.             idx_m, idx_p = np.argmax(fft_m_prom),
    np.argmax(fft_p_prom)
123.             print(f"\nPROM: Mesa {freq_ref[idx_m]:.2f}Hz, Probeta
    {freq_ref[idx_p]:.2f}Hz")
124.
125.             # Excel
126.             nombre = input("\nArchivo Excel: ").strip() or
    "Mediciones"
127.             with pd.ExcelWriter(os.path.join(RUTA_BASE,
    f"{nombre}.xlsx"), engine='openpyxl') as w:
128.                 # Datos crudos
129.                 df = pd.DataFrame()
130.                 for i, e in enumerate(ensayos, 1):
131.                     temp = pd.DataFrame({'Tiempo': e['t'],
    f'Mesa_E{i}': e['m'], f'Probeta_E{i}': e['p']})
132.                     df = temp if i == 1 else pd.concat([df,
    temp[[f'Mesa_E{i}', f'Probeta_E{i}']], axis=1)
133.                     df.to_excel(w, sheet_name='Datos_Crudos',
    index=False)
134.
135.                 # FFT ensayos
136.                 df_fft = pd.DataFrame({'Frecuencia': freq_ref})
137.                 for i, f in enumerate(ffts, 1):
138.                     df_fft[f'FFT_Mesa_E{i}'] = f['fft_m']
139.                     df_fft[f'FFT_Probeta_E{i}'] = f['fft_p']

```

```

140.         df_fft.to_excel(w, sheet_name='FFT_Ensayos',
index=False)
141.
142.         # FFT promedios
143.         pd.DataFrame({'Frecuencia': freq_ref,
'FFT_Mesa_Prom': fft_m_prom, 'FFT_Probeta_Prom':
fft_p_prom}).to_excel(w, sheet_name='FFT_Promedios', index=False)
144.
145.         # Resumen
146.         pd.DataFrame({
147.             'Ensayo': [f'E{i}' for i in range(1,4)] +
['PROM'],
148.             'Freq_Max_Mesa_Hz': [f['fmax_m'] for f in ffts]
+ [freq_ref[idx_m]],
149.             'Amp_Max_Mesa': [f['amax_m'] for f in ffts] +
[fft_m_prom[idx_m]],
150.             'Freq_Max_Probeta_Hz': [f['fmax_p'] for f in
ffts] + [freq_ref[idx_p]],
151.             'Amp_Max_Probeta': [f['amax_p'] for f in ffts] +
[fft_p_prom[idx_p]]
152.         }).to_excel(w, sheet_name='Resumen_Maximos',
index=False)
153.
154.         print(f"\n{' '*60}\n√ Guardado\n{' '*60}")
155.
156.     finally:
157.         ser_mesa.close()
158.         ser_probeta.close()

```

El gráfico de aceleración vs amplitud de la mesa (ver Ilustración 9. Aceleración vs tiempo de la mesa.), presenta los registros de aceleración de la mesa sísmica para tres ensayos de un caso de estudio. Las diferencias puntuales de amplitud pueden atribuirse a ruido instrumental y pequeñas variaciones durante la ejecución de la lectura del código.

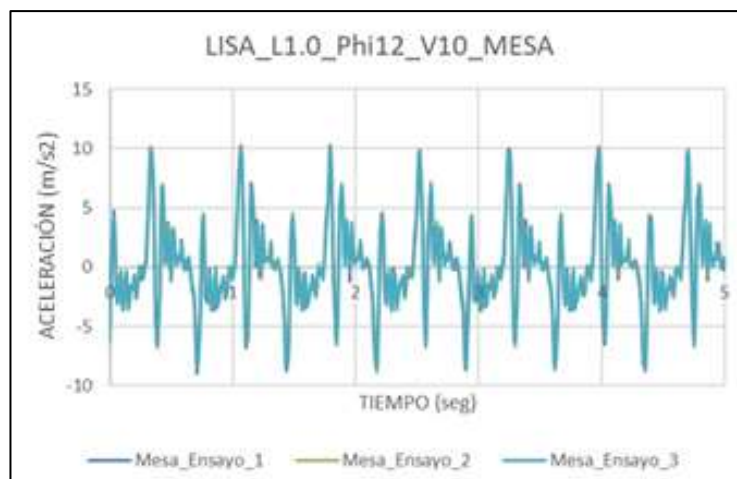


Ilustración 9. Aceleración vs tiempo de la mesa.

El gráfico de aceleración vs amplitud de la probeta (ver Ilustración 10. Aceleración vs tiempo de la probeta.), en comparación con la mesa, la probeta presenta mayores amplitudes de aceleración, lo que sugiere amplificación dinámica de la respuesta estructural frente a la excitación aplicada.

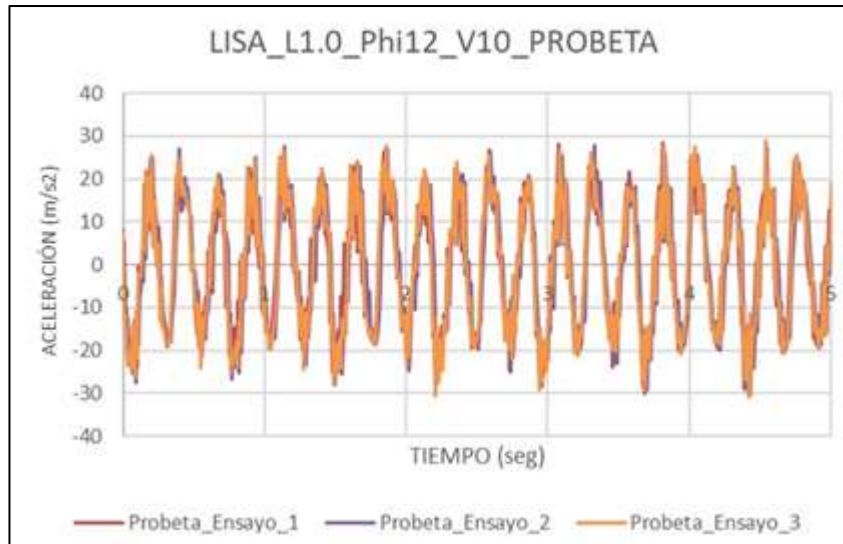


Ilustración 10. Aceleración vs tiempo de la probeta.

El gráfico de frecuencia y amplitud de la mesa (ver Ilustración 11. Frecuencia y amplitud de la mesa.), corresponde al espectro de frecuencia de la señal de aceleración de la mesa. Se puede observar que la mayor concentración de picos en la amplitud se localiza en el rango de bajas frecuencias.

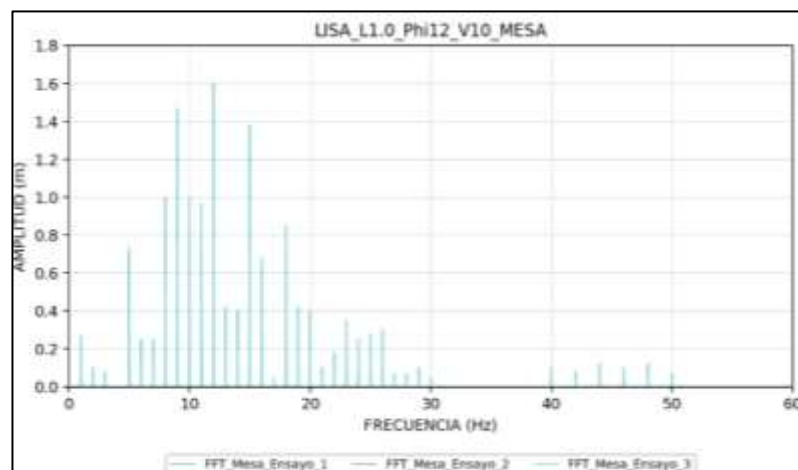


Ilustración 11. Frecuencia y amplitud de la mesa.

El gráfico de frecuencia y amplitud de la probeta (ver Ilustración 12. Frecuencia y amplitud de la probeta.), presenta el espectro de frecuencia de la aceleración registrada en la probeta. Se identifican picos dominantes en un rango específico de baja frecuencia.

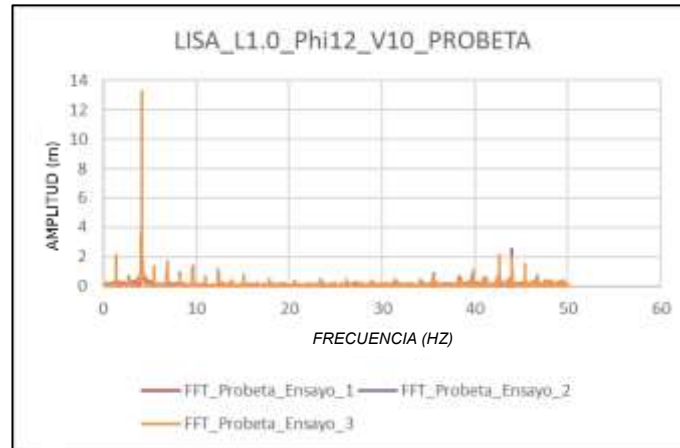


Ilustración 12. Frecuencia y amplitud de la probeta.

3.2. Resultados de mediciones realizadas.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la calibración numérica aplicada al modelo del péndulo invertido, comparando la respuesta simulada con los datos obtenidos durante los ensayos en mesa sísmica.

Una vez realizados todos los ensayos se determinó en base a su longitud, su frecuencia natural y cada uno de los diámetros de cada varilla, los valores promedio, y su variabilidad en Ilustración 14. Frecuencia fundamental medida: probetas con varilla cuadrada. e Ilustración 13. Frecuencia fundamental medida: probetas con varilla circular.

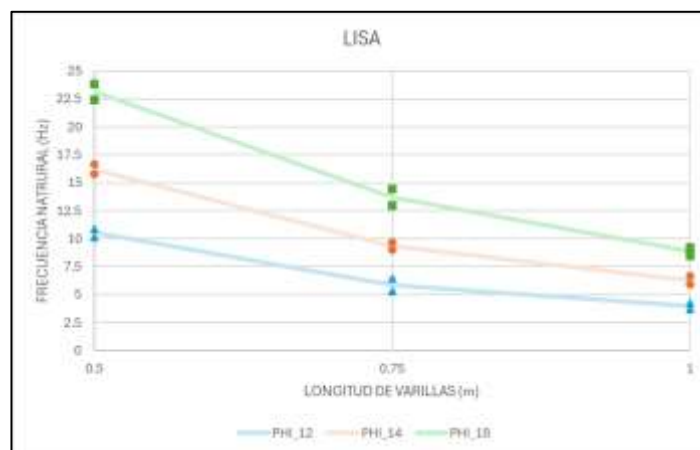


Ilustración 13. Frecuencia fundamental medida: probetas con varilla circular.



Ilustración 14. Frecuencia fundamental medida: probetas con varilla cuadrada.

Para caracterizar el amortiguamiento, se realizaron registros de respuesta libre mediante la aplicación de una aceleración inicial en la masa superior, dejando que el sistema oscile hasta el reposo. Bajo estas condiciones, la disipación observada no se comporta como un amortiguamiento puramente viscoso constante, sino que presenta rasgos compatibles con pérdidas por fricción y rozamiento. Por ello, se adoptó el modelo de amortiguamiento por fricción de Coulomb como aproximación para cuantificar un amortiguamiento equivalente. Durante todo el proceso, el sistema de adquisición basado en ESP32 permaneció en lectura continua, registrando la señal de aceleración de la probeta, lo que permite observar directamente cómo la amplitud disminuye con el tiempo como consecuencia de la disipación de energía.

En los siguientes gráficos se presenta el procedimiento utilizado para estimar el amortiguamiento de cada configuración de varilla. Donde se estimó un amortiguamiento equivalente a partir del comportamiento de la respuesta, y se identifica la envolvente de la señal ajustándola mediante una línea de tendencia que represente la disminución progresiva de la amplitud, obteniendo así un parámetro comparable entre varillas.

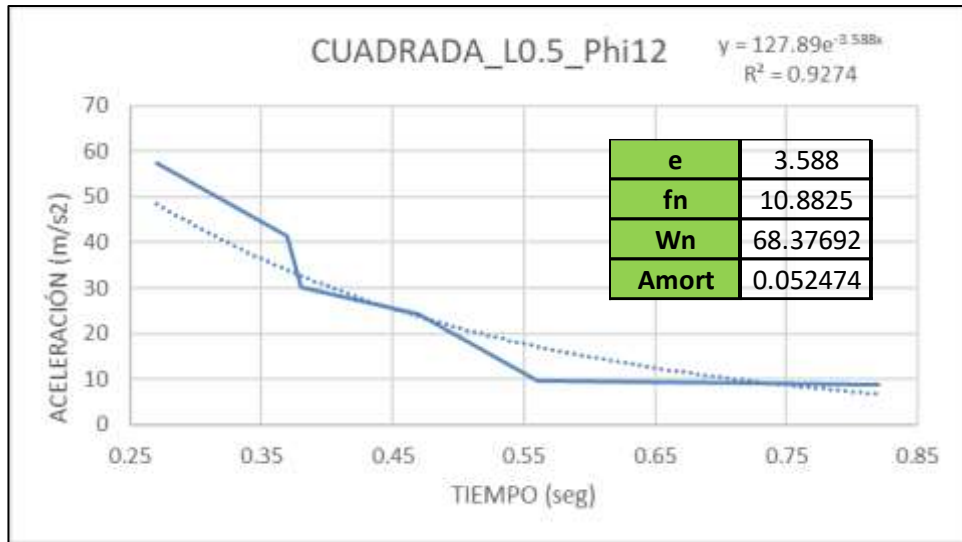


Ilustración 15. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L0.5_Phi12.

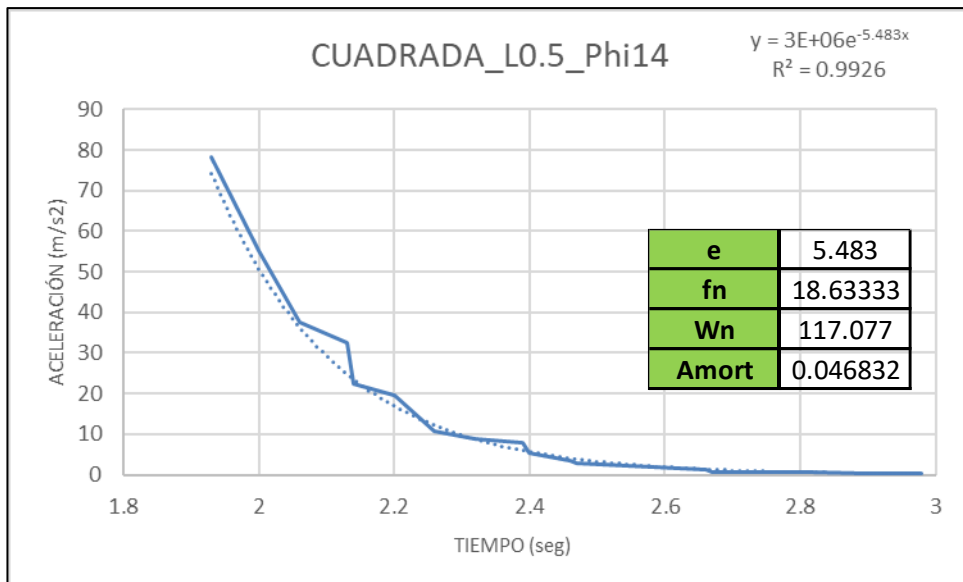


Ilustración 16. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L0.5_Phi14.

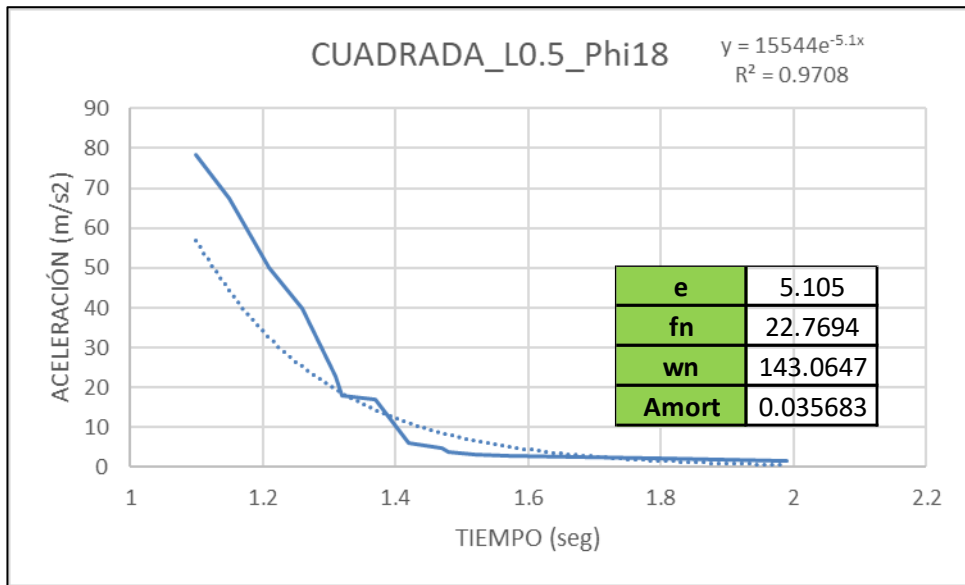


Ilustración 17. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L0.5_Phi18.

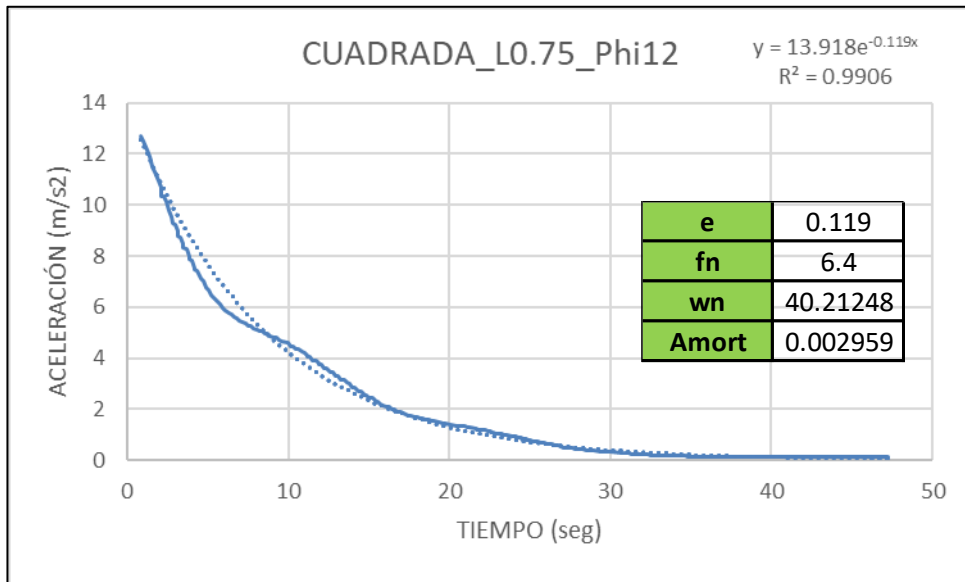


Ilustración 18. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L0.75_Phi12.

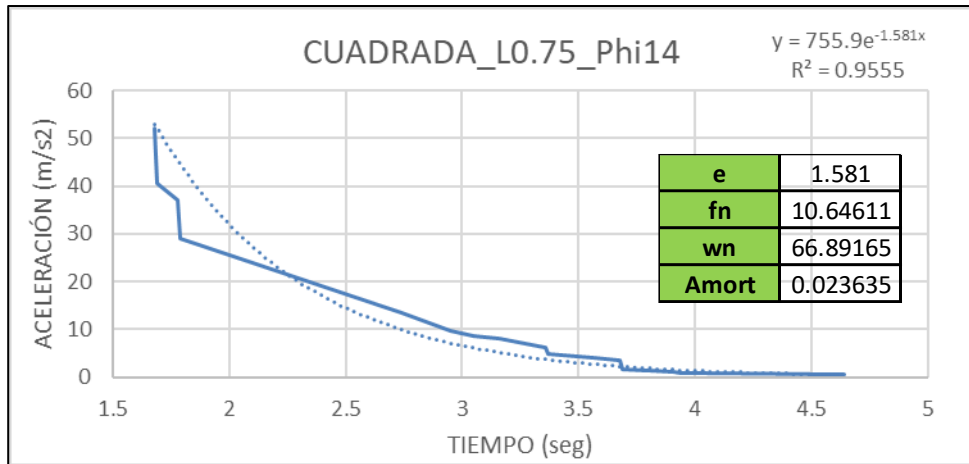


Ilustración 19. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L0.75_Phi14.

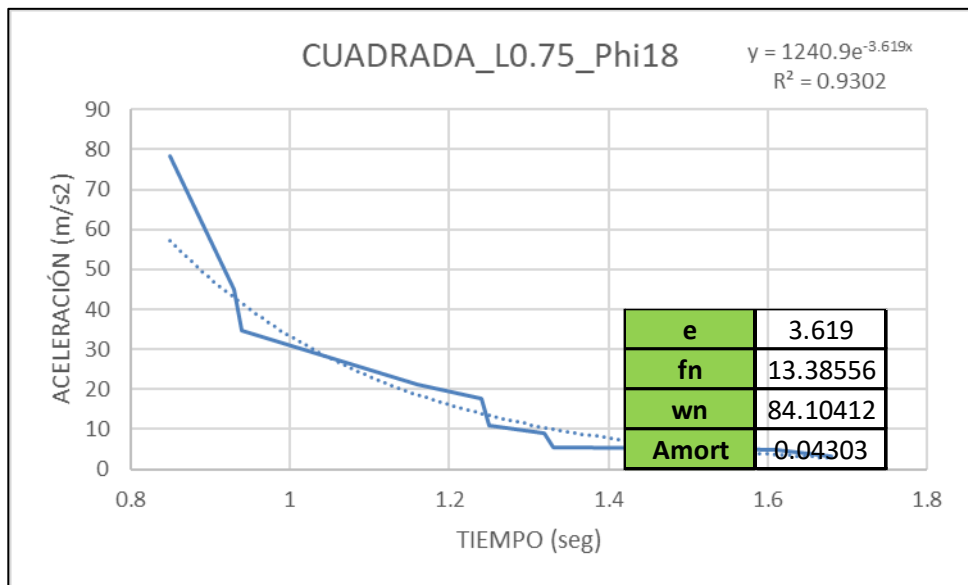


Ilustración 20. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L0.75_Phi18.

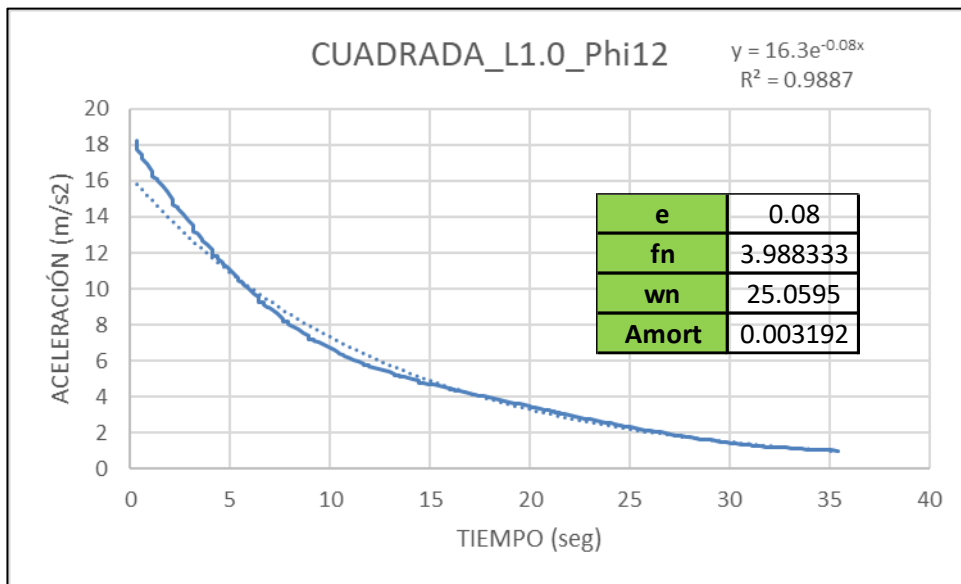


Ilustración 21. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L1.0_Phi12.

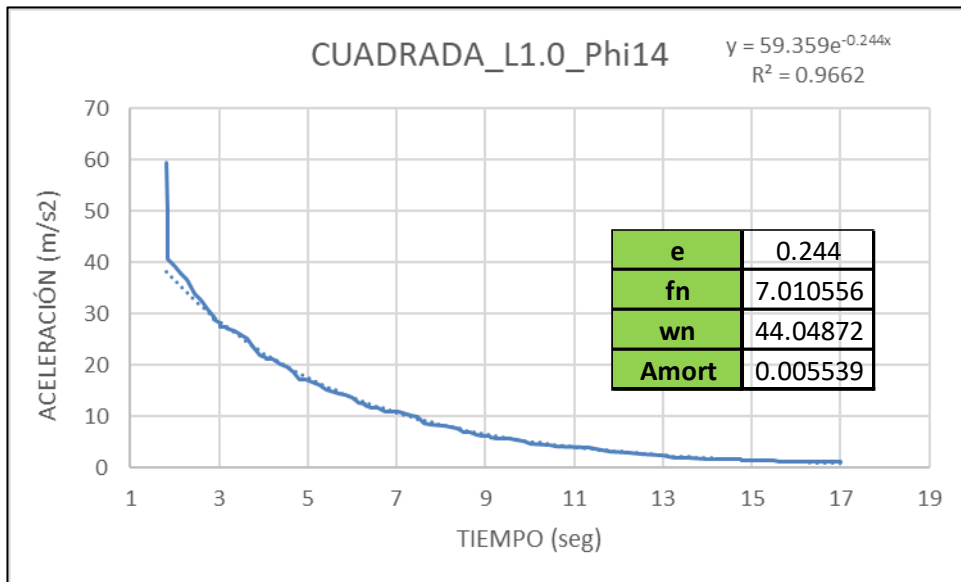


Ilustración 22. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L1.0_Phi14.

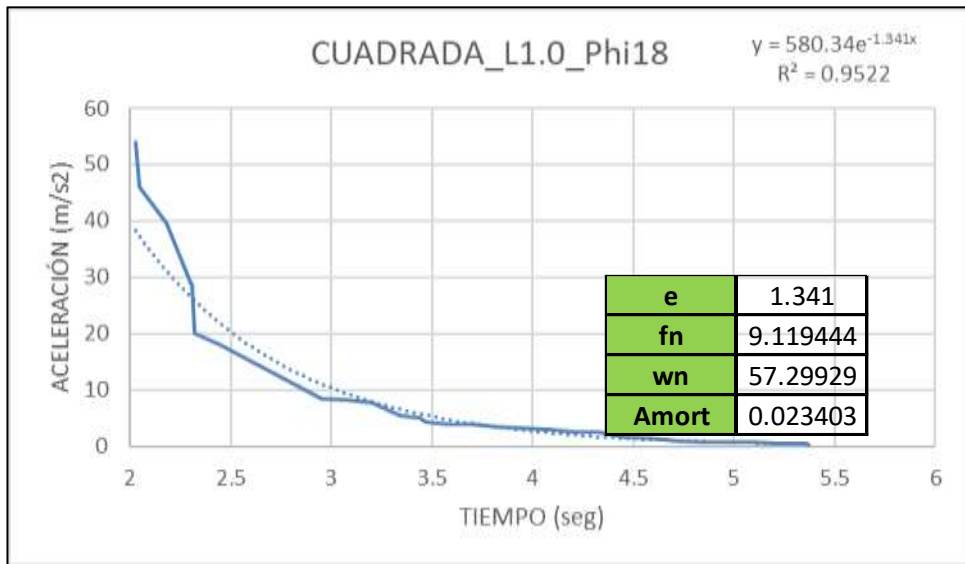


Ilustración 23. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – CUADRADA_L1.0_Phi18.

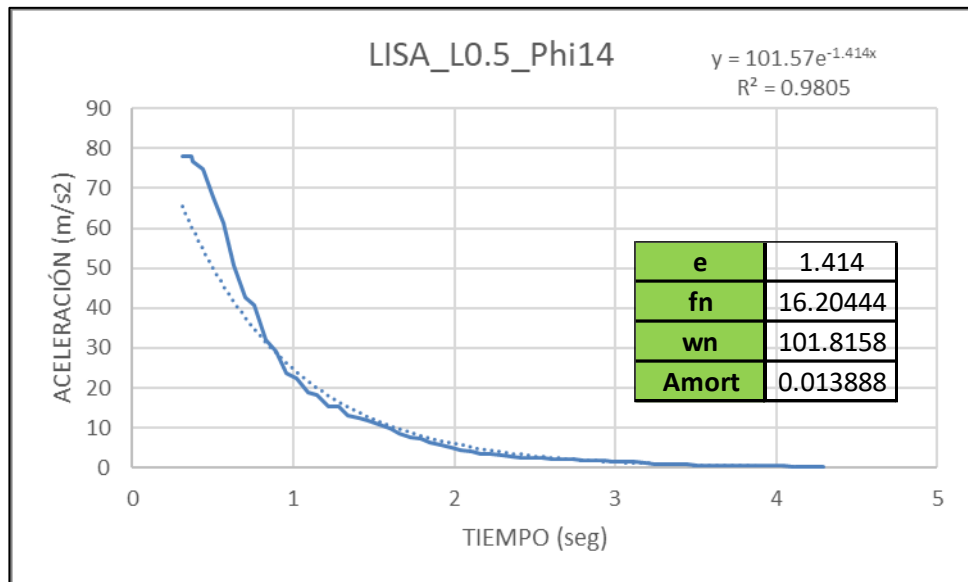


Ilustración 24. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – LISA_L0.5_Phi14.

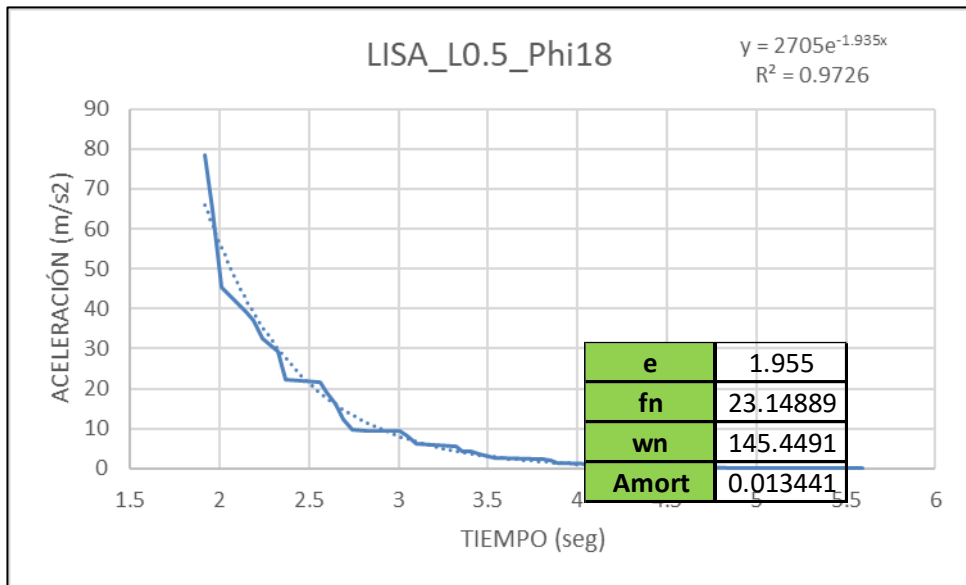


Ilustración 25. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – LISA_L0.5_Phi18.

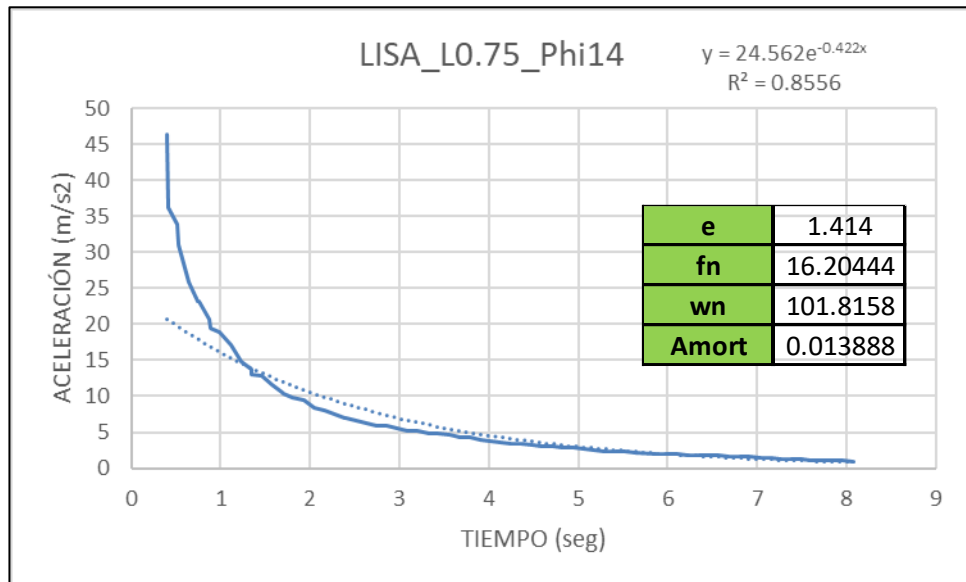


Ilustración 26. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – LISA_L0.75_Phi14.

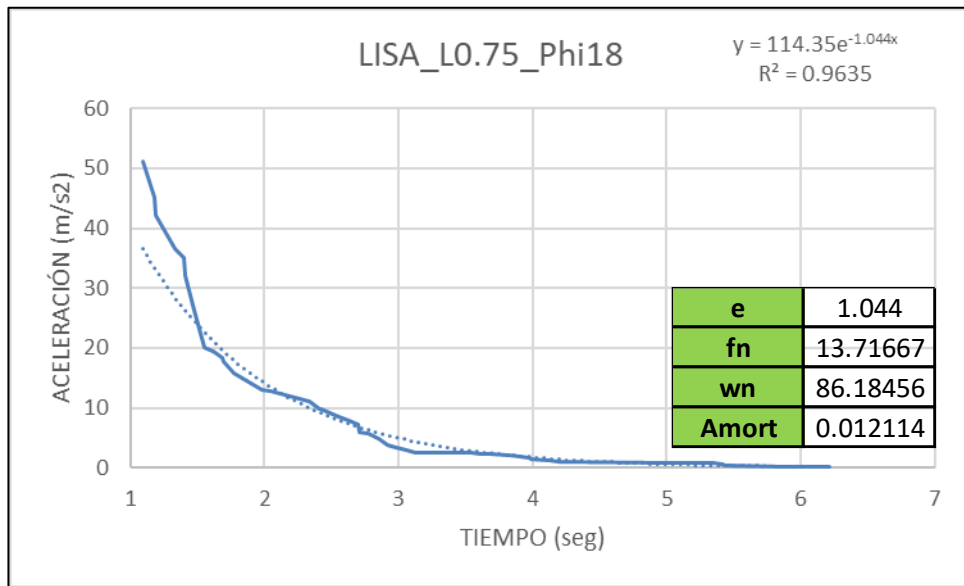


Ilustración 27. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – LISA_L0.75_Phi18.

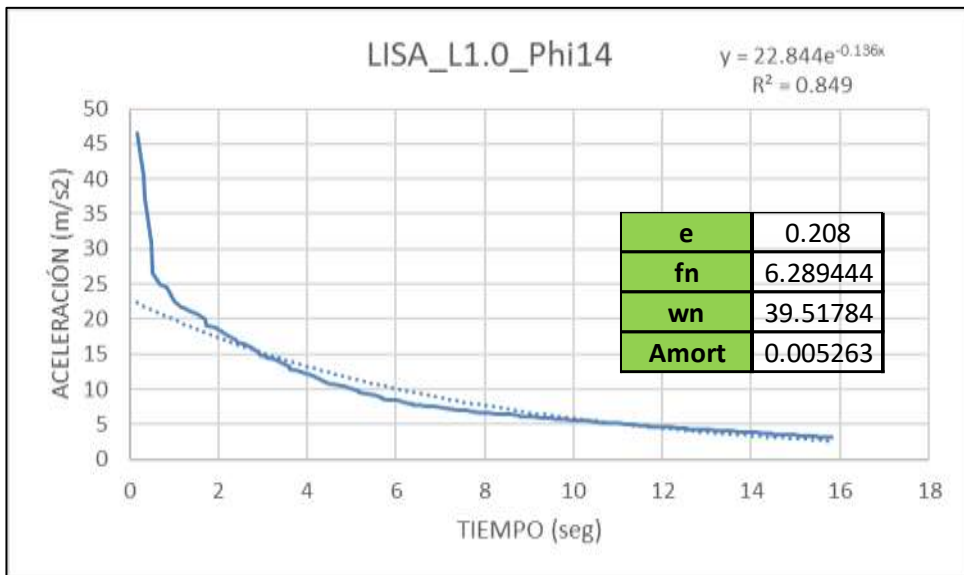


Ilustración 28. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – LISA_L1.0_Phi14.

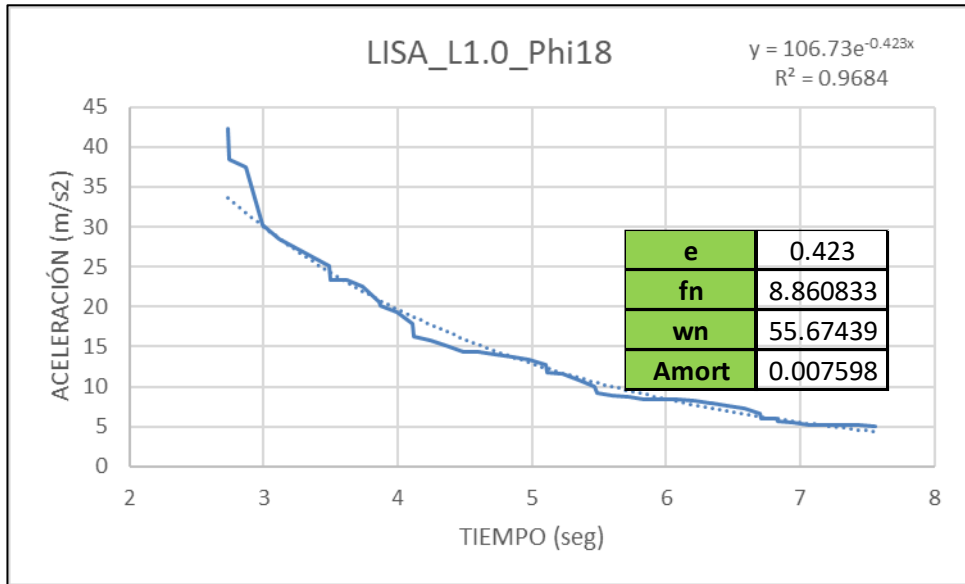


Ilustración 29. Estimación de amortiguamiento (Coulomb) – LISA_L1.0_Phi18.

3.3. Resultados del modelo numérico



Ilustración 30. Relación del amortiguamiento equivalente con la longitud de varilla en probetas de sección circular.

En el gráfico de relación del amortiguamiento equivalente con la longitud de varilla en probetas de sección circular (ver Ilustración 30), se observa que el comportamiento no es estrictamente lineal para todos los diámetros, lo que indica una interacción entre altura e inercia en la disipación de energía. Sin embargo, si mantiene una tendencia donde a mayor altura de probeta, el amortiguamiento tiende a ir disminuyendo.



Ilustración 31. Relación del amortiguamiento equivalente con la longitud de varilla en probetas de sección cuadrada.

En el gráfico de relación del amortiguamiento equivalente con la longitud de varilla en probetas de sección cuadrada (ver Ilustración 31), se aprecia una tendencia general de reducción del amortiguamiento al aumentar la altura efectiva de la probeta, a diferencia de las secciones circulares, esta tendencia se mantiene en todos los diámetros de varillas de sección cuadrada.

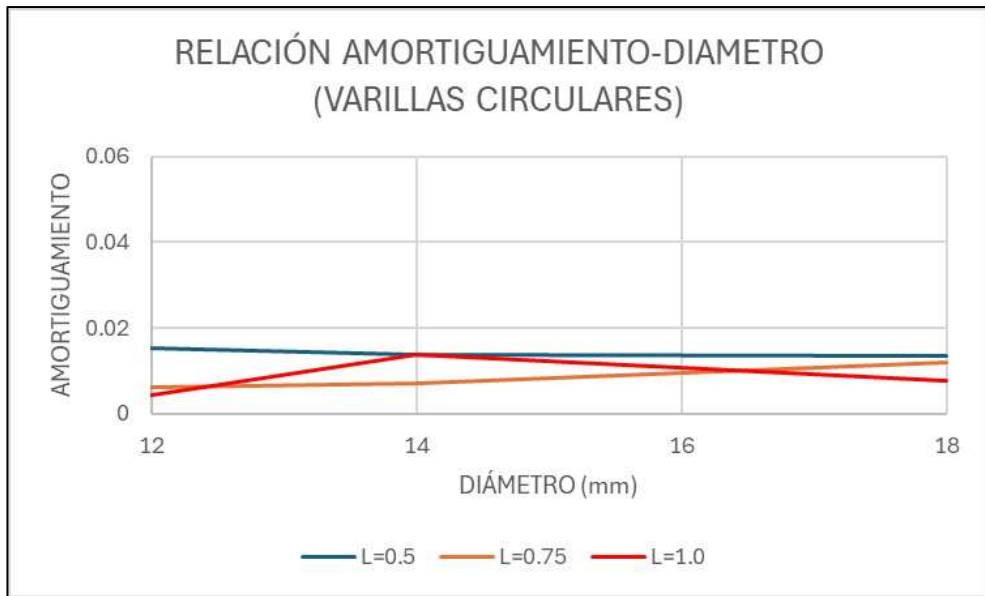


Ilustración 32. Relación del amortiguamiento equivalente con el diámetro en probetas de sección circular.

En el gráfico de relación del amortiguamiento equivalente con el diámetro en probetas de sección circular (ver Ilustración 32), se observa una variación muy pequeña en los valores de amortiguamiento en los diferentes diámetros ensayados.

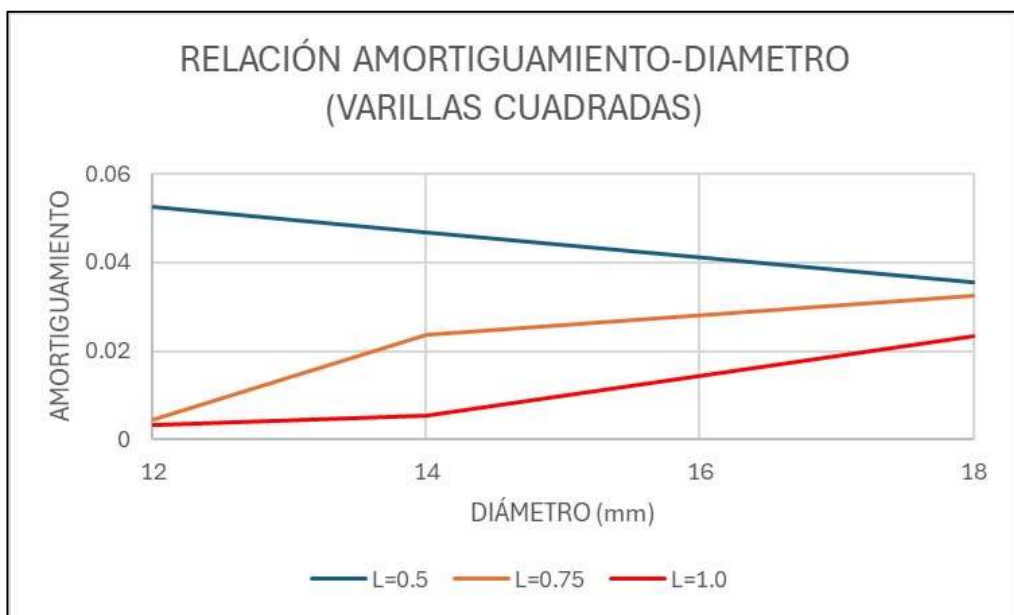


Ilustración 33. Relación del amortiguamiento equivalente con el diámetro en probetas de sección cuadrada.

En el gráfico de relación del amortiguamiento equivalente con el diámetro en probetas de sección cuadrada (ver Ilustración 33), a diferencia de las varillas circulares, aquí se observa una mayor dispersión en los valores de amortiguamiento entre los diferentes diámetros analizados. En algunas longitudes el amortiguamiento disminuye con el aumento del diámetro, mientras que en otras incrementa.

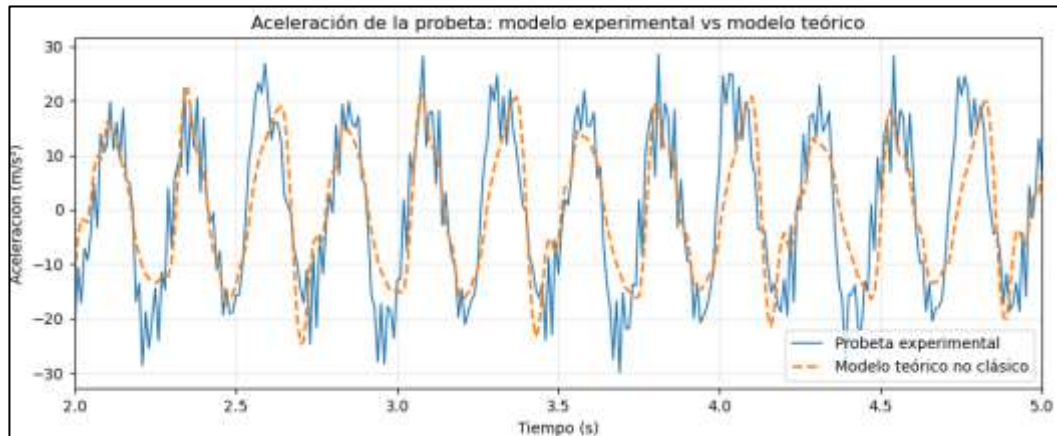


Ilustración 34. Comparación de aceleración de la probeta: modelo experimental vs modelo teórico no-clásico.

El gráfico de comparación de aceleración de la probeta (ver Ilustración 34), muestra la calibración realizada en el modelo teórico con respecto a los resultados obtenidos experimentalmente de aceleraciones en la probeta, consiguiendo así valores equivalentes de amortiguamiento C_1 y C_2 para nuestro caso de análisis.

Tabla 2. Parámetros calibrados de amortiguamiento.

Parámetros calibrados de amortiguamiento	
C1	0.0001
C2	1.5295

La calibración del modelo teórico no clásico se realizó mediante el ajuste de los coeficientes de amortiguamiento C_1 y C_2 , con el objetivo de reducir la diferencia entre la aceleración teórica y la aceleración medida experimentalmente en la probeta, permitieron reproducir de manera adecuada la respuesta dinámica observada en el ensayo.

CAPÍTULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se determinó que la mesa sísmica utilizada presenta una limitación de capacidad para excitar a ciertas probetas con la intensidad requerida, de manera que la excitación aplicada no logra aproximarse lo suficiente a la frecuencia natural del sistema para inducir condiciones cercanas a resonancia, que constituía uno de los objetivos del trabajo. En consecuencia, para las configuraciones más rígidas, la respuesta medida se mantiene en un rango donde la amplitud es reducida y la identificación de parámetros dinámicos se vuelve menos sensible.

Sin embargo, se midió la respuesta de cada sistema en condición libre, a partir de lo cual se pudo estimar el nivel de amortiguamiento a partir del decaimiento de la respuesta.

Se observó que las probetas de sección cuadrada presentan mayores niveles de amortiguamiento que las circulares, dando a entender que la inercia del sistema afecta en gran medida la disipación de energía. Así mismo, se pudo observar una tendencia con respecto a las características geométricas de las probetas, donde a partir de cierta altura, el amortiguamiento tiende a aumentar según la inercia de la varilla, sin embargo, cuanto más va aumentando la altura de la estructura, se tienden a obtener valores de amortiguamiento menores.

4.2. Recomendaciones

Se recomienda utilizar varillas de menor diámetro que las empleadas en esta investigación, ya que una probeta menos rígida requiere menores niveles de excitación para alcanzar amplitudes de respuesta representativas y, condiciones cercanas a resonancia dentro de la capacidad de la mesa sísmica. Como referencia práctica, se sugiere evaluar diámetros del orden de 8 mm o 10 mm, ajustando la altura de la probeta de forma controlada, debido a que longitudes mayores generan desplazamientos más grandes y pueden incrementar el riesgo de golpe o colapso durante el ensayo.

REFERENCIAS

- Barros, J., Chiachío, M., Chiachío, J., & Cabanilla, F. (2022). Adaptive approximate Bayesian computation by subset simulation for structural model calibration. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37(6), 726–745. <https://doi.org/10.1111/mice.12762>
- Chen, Y., Wang, H., Wang, Y., Zhang, J., Bao, Z., Li, J., Chen, M., & Xu, P. (2024). Research on the Value of Rayleigh Damping Parameter in Explicit and Implicit Integrals for Dynamic Analysis of Large Structures. *Buildings*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/buildings14051286>
- Ghahari, F., Sargsyan, K., & Taciroglu, E. (2024). Quantification of modeling uncertainty in the Rayleigh damping model. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 53(9), 2950–2956. <https://doi.org/10.1002/eqe.4143>
- Lu, D., Wang, G., Du, X., & Wang, Y. (2017). A nonlinear dynamic uniaxial strength criterion that considers the ultimate dynamic strength of concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 103, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.01.011>
- Pennestrì, E., Rossi, V., Salvini, P., & Valentini, P. P. (2016). Review and comparison of dry friction force models. In *Nonlinear Dynamics* (Vol. 83, Number 4, pp. 1785–1801). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11071-015-2485-3>
- Qu, C., Tu, G., Gao, F., Sun, L., Pan, S., & Chen, D. (2024). Review of Bridge Structure Damping Model and Identification Method. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 16, Number 21). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/su16219410>
- Sun, P., Yan, Y., & Yang, H. (2024). Complex mode superposition method of non-classically damped systems based on hysteretic damping model with frequency-dependent loss factors. *Journal of Sound and Vibration*, 571. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118122>

Takewaki, I., & Akehashi, H. (2021). Comprehensive Review of Optimal and Smart Design of Nonlinear Building Structures With and Without Passive Dampers Subjected to Earthquake Loading. In *Frontiers in Built Environment* (Vol. 7). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2021.631114>.



DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián, con C.C: # 0931079404, y Guamán Narváez, Franklin Danilo, con C.C: # 0956655831, autores del trabajo de titulación: Amortiguamiento no-clásico en estructuras de péndulo invertido, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaramos tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizamos a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, 27 de febrero de 2026

f. _____
Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián
0931079404

f. _____
Guamán Narváez, Franklin Danilo
0956655831

REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

TEMA:	Amortiguamiento no-clásico en estructuras de péndulo invertido		
AUTOR(ES)	Cedeño Cevallos, Andrés Sebastián & Guamán Narváez, Franklin Danilo		
REVISOR(ES)/TUTOR(ES)	Barros Cabezas, José Andrés		
INSTITUCIÓN:	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
FACULTAD:	Ingeniería		
CARRERA:	Ingeniería Civil		
TÍTULO OBTENIDO:	Ingeniero Civil		
FECHA DE PUBLICACIÓN:	27 de febrero de 2026	No. DE PÁGINAS:	37
ÁREAS TEMÁTICAS:	Construcción, Ingeniería Estructural, Diseño sismorresistente.		
PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:	Amortiguamiento no clásico, Péndulo invertido, Mesa sísmica, Calibración, Frecuencia fundamental, Fourier.		
<p>RESUMEN/ABSTRACT (150-250 palabras): La presente investigación estima la influencia de la altura, inercia y frecuencia de carga en el amortiguamiento de estructuras de acero de tipo péndulo invertido de un grado de libertad, mediante ensayos de laboratorio y calibración de modelos numéricos, para establecer los coeficientes de amortiguamiento no-clásico de este tipo de estructuras. La metodología se dividió en tres etapas: ensayos experimentales, procesamiento de señales y modelación numérica y calibración para reproducir la respuesta observada. Los ensayos se realizaron con la mesa sísmica del Laboratorio de Aguas como excitación dinámica controlada, aplicando una entrada unidireccional en el eje X; debido a que el equipo opera con un controlador de 10 niveles, se lo caracterizó para asociar cada nivel con la frecuencia efectiva medida. La instrumentación empleó un sistema de adquisición basado en ESP32 y acelerómetros MPU-6050, instalados en la mesa para registrar la aceleración de entrada y en la masa superior de la probeta para registrar su respuesta.</p> <p>Con los registros se determinó la frecuencia fundamental de cada configuración de varilla (sección cuadrada y circular) y, posteriormente, se estimó un amortiguamiento equivalente a partir de respuestas libres, adoptando el modelo de fricción de Coulomb por presentar pérdidas por rozamiento. Como apoyo al ajuste de parámetros, se consideró la calibración bayesiana para actualizar el modelo a partir de datos experimentales. Los resultados muestran que la mesa sísmica presenta limitaciones para excitar ciertas probetas hasta condiciones cercanas a resonancia.</p>			
ADJUNTO PDF:	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
CONTACTO CON AUTOR/ES:	Teléfono: +593981281107 +593990236842	E-mail: sebas.c.1204@gmail.com guamannarvaezf@gmail.com	
CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO DE TITULACIÓN):	Nombre: Glas Cevallos, Clara Catalina		
	Teléfono: +593-4-984616792		
	E-mail: clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA			
Nº. DE REGISTRO (en base a datos):			
Nº. DE CLASIFICACIÓN:			
DIRECCIÓN URL (tesis en la web):			