



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

**Desarrollo de un modelo analítico de columna de hormigón armado  
que considere la degradación frente a eventos sísmicos.**

**AUTOR (ES):**

**Balón Vera, Cristhian Saúl  
Moreira Peñafiel, Amy Geomayra**

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

**TUTOR:**

**Ponce Vásquez, Guillermo Alfonso**

**Guayaquil, Ecuador**

**08 de septiembre del 2025**

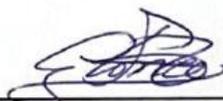


UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo de titulación fue realizado en su totalidad por **Balón Vera, Cristhian Saúl y Moreira Peñafiel Amy Geomayra**, como requerimiento para la obtención del título de **Ingeniero/a Civil**.

TUTOR

f. 

**Ing. Ponce Vásquez, Guillermo Alfonso M.Sc.**

DIRECTORA DE LA CARRERA

f.   
Firmado electrónicamente por:  
STEFANY ESTHER  
ALCIVAR BASTIDAS  
Validar Únicamente con FirmAC

**Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, Ph.D.**

**Guayaquil, a los 8 del mes de septiembre del año 2025**



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

## DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Balón Vera, Cristhian Saúl y Moreira Peñafiel Amy**  
**Geomayra**

### DECLARAMOS QUE:

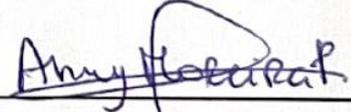
El Trabajo de Titulación, **Desarrollo de un modelo analítico de columna de hormigón armado que considere la degradación frente a eventos sísmicos**, previo a la obtención del título de **Ingeniero/a Civil**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan 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 8 del mes de septiembre del año 2025**

### LOS AUTORES

f.   
\_\_\_\_\_  
**Balón Vera, Cristhian Saúl**

f.   
\_\_\_\_\_  
**Moreira Peñafiel Amy Geomayra**



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

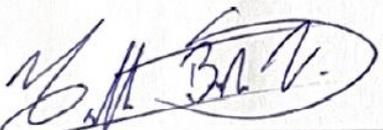
## AUTORIZACIÓN

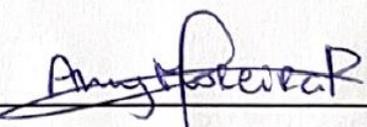
Nosotros, **Balón Vera, Cristhian Saúl y Moreira Peñafiel Amy Geomayra**

Autorizamos a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la **publicación** en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación, **Desarrollo de un modelo analítico de columna de hormigón armado que considere la degradación frente a eventos sísmicos**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

Guayaquil, a los 8 del mes de septiembre del año 2025

### LOS AUTORES

f.   
Balón Vera, Cristhian Saúl

f.   
Moreira Peñafiel Amy Geomayra

# REPORTE COMPILATIO



CERTIFICADO DE ANÁLISIS  
magister

TT  
Balon\_Cristhian\_Moreira\_Amy\_FINAL  
AL (1)



firmado digitalmente por  
GUILLERMO ALFONSO  
PONCE VASQUEZ

7%  
Textos  
sospechosos



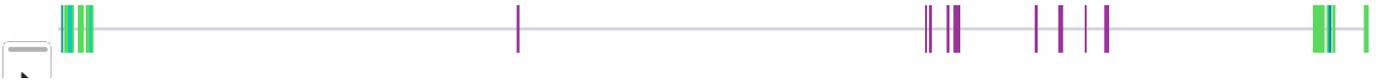
- Similitudes
- 0% similitudes entre comillas  
< 1% entre las fuentes  
mencionadas
  - 19% Idiomas no reconocidos  
(ignorado)
  - 2% Textos potencialmente  
generados por la IA

Nombre del documento: TT Balon\_Cristhian\_Moreira\_Amy\_FINAL  
(1).docx  
ID del documento: 509428c74f13727aeb388cfd0da98480db4f42dd  
Tamaño del documento original: 2,11 MB

Depositante: Clara Catalina Glas Cevallos  
Fecha de depósito: 15/9/2025  
Tipo de carga: interface  
fecha de fin de análisis: 15/9/2025

Número de palabras: 12.095  
Número de caracteres: 89.437

Ubicación de las similitudes en el documento:



## **AGRADECIMIENTO**

Principalmente agradezco a mi familia, a mi padre quien fue la fuente de inspiración y quien en todo momento nunca dejo de creer en mí, brindándome un apoyo incondicional y una confianza que solo un padre puede entregar.

A mi abuelo, quien me ayudo a mí y a mi familia en los momentos más fuertes y supo brindarme su apoyo cuando más lo necesitaba, siendo un padre, un amigo y un mentor que hace todo a su alcance para verme progresar.

A las mujeres en mi vida, mi madre, mis abuelas y mis tías quienes supieron brindarme alientos de esperanza y darme consejos en una etapa nueva en mi vida, preocuparse de una forma constante como más nadie lo hacía.

Por su puesto agradezco a todas esas personas que influyeron en mí de diversas formas y realizaron esta etapa de mi vida como una de las más entrañables que he experimentado, amigos, compañeros y docentes que aportaron de diferentes maneras.

**Cristhian Saúl Balón Vera**

## **DEDICATORIA**

*Para aquellos que siempre confiaron en mí y me ayudaron a lo largo de esta etapa, son parte de este proceso y aportaron de múltiples formas en lo bueno y en lo malo. Dedico cada acción que tome para llegar a este punto de mi vida.*

**Cristhian Saúl Balón Vera**

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por regalarme cada día de vida, por la oportunidad de estudiar y alcanzar esta gran meta, y por las incontables bendiciones que me concede en cada etapa de mi camino.

A mi familia, en especial a mis padres, por su apoyo incondicional y por recordarme siempre que con perseverancia, disciplina y esfuerzo todo se puede lograr. Gracias por impulsarme a crecer cada día como persona, estudiante y ahora también como profesional. A mi hermano, gracias por confiar siempre en mí y en todo lo que puedo alcanzar.

A Joel, gracias por tu apoyo constante y por estar a mi lado en cada momento. Este proceso fue más llevadero y especial gracias a tu compañía. Gracias por celebrar nuestros pequeños grandes logros.

A mis amigas por siempre estar y ser las mejores. A mis compañeros y docentes, gracias por los conocimientos compartidos y por las palabras de aliento que me motivaron a seguir adelante.

Finalmente, a mis amigos del ACI Student Chapter UCSG, gracias por permitirme guiarlos y por guiarme también; por poner siempre empeño, compromiso y cariño en cada actividad, logrando juntos que todo salga como lo planificamos.

**Amy Geomayra Moreira Peñafiel**

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, quienes han estado conmigo en cada paso, con palabras de motivación y amor, y me enseñaron que el esfuerzo y la dedicación son la base de todo logro. Esto es por y para ustedes.*

*Amy Geomayra Moreira Peñafiel*



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

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

f.



STEFANY ESTHER  
ALCIVAR BASTIDAS

\_\_\_\_\_  
**Ing. Alcívar Bastidas, Stefany Esther, Ph.D.**  
DIRECTORA DE CARRERA

f.

\_\_\_\_\_  
**Ing. Jaime Hernández Barredo M.Sc.**

DELEGADO DE ÁREA

f.

\_\_\_\_\_  
**Ing. José Andrés Barros Cabezas, Ph. D.**

OPONENTE

# ÍNDICE

REPORTE COMPILATIO .....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
DEDICATORIA.....	VII
AGRADECIMIENTO.....	VIII
DEDICATORIA.....	IX
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT .....	XVII
INTRODUCCIÓN .....	2
Antecedentes .....	2
Objetivos .....	4
Objetivo General .....	4
Objetivos Específicos.....	4
Alcance.....	5
CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO .....	6
Comportamiento sísmico de las estructuras de hormigón armado.....	6
Importancia del estudio del comportamiento sísmico en estructuras de hormigón armado. ....	6
Mecanismo de respuesta del hormigón armado bajo cargas cíclicas. ....	6
Ensayos pseudo estáticos y el vínculo con la dinámica real. ....	9
OpenSeesPY .....	11
Capacidades de modelado .....	11
Concrete07 .....	12

Hysteretic .....	13
FiberSection .....	14
ForceBeamColumn.....	15
Lobatto .....	16
NewtonCotes .....	17
Rayleigh .....	18
Modelo .....	19
Espécimen .....	19
Eventos sísmicos .....	20
Japón 2011.....	20
Chile 2010 .....	21
CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO .....	22
Procesamiento de datos .....	22
Modelo numérico de la columna.....	22
Cargas, condiciones de borde.....	23
Ajustes y métricas de Validación .....	23
Calibración Bayesiana (ABC-SubSim) .....	23
Validación del modelo .....	24
Proceso de Calibración.....	24
CAPÍTULO 3: RESULTADOS .....	26
Resultados del Modelo – Japón 2011.....	27
Resultados del Modelo – Japón 2011 y Chile 2010.....	28
CONCLUSIONES .....	30

RECOMENDACIONES .....	31
BIBLIOGRAFÍA.....	32
ANEXOS.....	39
DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN .....	2

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Espécimen recreado en AutoCAD. Autoría Propia.....	19
Ilustración 2. Representación 3D del ensayo. Autoría propia.....	20
Ilustración 3. (Britannica, Escenas de devastación tras el terremoto y tsunami de Tohoku, 2011) .....	21
Ilustración 4. (Britannica, Edificio colapsado en Concepción tras el terremoto de Maule, 2010) .....	21
Ilustración 6. Gráficas de resultados del Modelo – Japón 2011. Autoría Propia. ....	27
Ilustración 7. Gráficas de resultados del Modelo – Japón 2011 y Chile 2010. Autoría Propia. ....	28

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características del espécimen (Ponce, 2022) .....	19
Tabla 2. Parámetros Fijos. Autoría Propia. ....	26

## RESUMEN

Se presenta el desarrollo de un modelo analítico de columnas de hormigón armado sometidas a las solicitaciones sísmicas, implementado el software OpenSeesPy con la finalidad de analizar los diversos efectos dinámicos y la progresiva degradación de los elementos estructurales. Para su construcción se emplearon conceptos de no-linealidad en los materiales y se emplearon modelos constitutivos, tales como Concrete07 para el concreto y Hysteretic para el acero, efectos de segundo orden mediante P-Delta y amortiguamiento Rayleigh. El modelo fue calibrado utilizando un enfoque de aproximación bayesiana, lo que permitió ajustar parámetros en función de datos experimentales obtenidos previamente y con registros sísmicos reales. Entre los registros sísmicos utilizados para el trabajo está el de Japón 2011 y Chile 2010, estos sismos fueron seleccionados por sus características de intensidad y duración. Aunque en los resultados se obtuvo tendencias en los desplazamientos y deformaciones, estas no mostraban similitudes altas con los ensayos realizados. Entre las diferencias importantes se observa en los periodos de vibración, esto evidencia las dificultades que existen cuando se quiere representar con exactitud los aspectos dinámicos de una estructura frente a estas solicitaciones sísmicas.

*Palabras claves:* Hormigón armado; Comportamiento sísmico; OpenSeesPy; Calibración bayesiana; Degradación estructural; Modelos constitutivos.

## ABSTRACT

This paper presents the development of an analytical model of reinforced concrete columns subjected to seismic loads, implemented using OpenSeesPy software with the aim of analyzing the various dynamic effects and the progressive degradation of structural elements. Nonlinear material concepts were used in its construction, and constitutive models were implemented, such as Concrete07 for concrete and Hysteretic for steel, second-order effects using P-Delta, and Rayleigh damping. The model was calibrated using a Bayesian approximation approach, which allowed parameters to be adjusted based on previously obtained experimental data and actual seismic records. Among those used were the 2011 Japan and 2010 Chile earthquakes, selected for their duration and intensity. The results showed that, although the model was able to reproduce general trends in displacements and deformations, the similarity with the experimental tests was not high. In particular, significant differences were observed in the vibration periods, notably in the simulation of the 2010 Chile earthquake, highlighting the difficulties of accurately representing all the dynamic aspects of reinforced concrete behavior under complex seismic stresses.

*Keywords: Reinforced concrete; Seismic behavior; OpenSeesPy; Bayesian calibration; Structural degradation; Constitutive models.*

# INTRODUCCIÓN

## **Antecedentes**

El comportamiento que se desarrolla en las estructuras de hormigón armado durante un sismo se ha estudiado durante los últimos años analizando la vulnerabilidad de las edificaciones durante los movimientos sísmicos que se han presentado. Debido a esto se han desarrollado diferentes investigaciones con el objetivo de estudiar las respuestas de los elementos de hormigón armado, y poder generar un modelo analítico con mayor precisión para examinar el comportamiento estructural frente a este tipo de eventos. (Park & Ang, 1985) (Mander, Priestley, & Park, 1988)

Los ensayos pseudo estáticos se han convertido en una herramienta para la investigación de la respuesta de las estructuras sujetas a sismos, con los cuales se hace simulación del comportamiento dinámico que se genera en las columnas con cargas controladas que se le aplican. Sin embargo, estos ensayos presentan limitaciones, debido a que no pueden reflejar efectos importantes para que la simulación sea más apegada a la realidad cuando se trata de la parte dinámica, en ellos no se refleja amortiguamiento del elemento. (Carrillo & Alcocer, 2013) (Mander, Priestley, & Park, 1988)

Es por ello, que se explora y desarrollan modelos analíticos dinámicos que puedan obtener una simulación con una precisión adecuada con respecto al comportamiento de las columnas bajo los efectos sísmicos. Uno de los grandes avances en esta área fue realizada por (Park & Ang, 1985), quienes lograron ejecutar un modelo en donde se analiza el daño mecánico de hormigón armado y el cual si incluye los efectos de la no linealidad y el daño progresivo que se va generando a medida de las diversas sollicitaciones sísmicas aplicadas. Este modelo ha conseguido ser fundamental como referencia para realizar otras simulaciones en donde se puede obtener la degradación de la rigidez en diferentes elementos bajo el efecto sísmico de hormigón armado.

Adicionalmente, la herramienta OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) se ha convertido en la más utilizada para la simulación numérica en la modelación estructural de los elementos y sus materiales. Particularmente, el uso de la interfaz de Python para OpenSees, o también conocido

como OpenSeesPY, permite la integración de metodologías analíticas y de calibración concediendo a los profesionales, que buscan investigar la parte estructural de la ingeniería, obtener resultados más precisos y eficientes en las simulaciones (Zhu, McKenna, & Scott, 2018). Esta aplicación ha logrado de manera exitosa simulaciones a estructuras, poniendo en marcha modelos no lineales de diversos materiales, evaluando los resultados de estructuras complejas durante los sismos.

La aproximación bayesiana se considera una metodología para poder realizar calibraciones de diversos parámetros numéricos de los modelos y logrando una mayor exactitud de las simulaciones (Barros, Chiachio, Chiachio, & Cabanilla, 2021). Es una técnica que ajusta parámetros y experimenta con las incertidumbres de los datos que permanecen disponibles en el modelo. Tal como lo mencionan los autores Barros, Chiachio y Cabanilla, quienes han presentado un planteamiento que se basa en esta aproximación para obtener calibraciones de modelos estructurales, ellos utilizaron una simulación que se va desarrollando por subconjuntos obteniendo mejores aproximaciones y resultados más minuciosos en el presagio del comportamiento de las estructuras.

Este trabajo propuesto tiene como objetivo desarrollar un modelo analítico, mediante el uso de OpenSeesPY y junto a la implementación de la aproximación bayesiana, se logre representar con mayor precisión el comportamiento a nivel dinámico de las columnas, realizadas de hormigón armado, durante los eventos sísmicos que puedan presentar en su vida útil, aportando una herramienta para la evaluación estructural y contribuyendo a la investigación del área.

# **Objetivos**

## **Objetivo General**

Desarrollar un modelo analítico en OpenSeesPY de una columna de hormigón armado que simule de manera eficiente sus desplazamientos frente a eventos sísmicos, con el fin de evaluar su desempeño estructural y generar criterios que fortalezcan su diseño sismo-resistente.

## **Objetivos Específicos**

Seleccionar los modelos de materiales y elementos para representar el comportamiento dinámico de elementos de hormigón armado.

Crear un modelo analítico en OpenSeesPY que simule a las columnas ensayadas tomando en consideración sus materiales, dimensiones y comportamiento dinámico básico.

Calibrar el modelo analítico para que replique eficientemente el comportamiento de los desplazamientos de las columnas ensayadas sujetas a sismos.

## **Alcance**

El presente trabajo tiene como propósito desarrollar un modelo analítico en OpenSeesPy que permita simular el comportamiento de columnas de hormigón armado ante movimientos sísmicos. No se busca únicamente contar con una herramienta para el análisis de columnas, sino también sentar las bases que permitan, en el futuro, ampliar el estudio hacia otros elementos de hormigón armado que forman parte de una estructura. Con el uso de la aproximación bayesiana se espera obtener resultados que puedan adaptarse a diferentes tipos de estructuras, logrando así un enfoque más amplio y general.

El modelo planteado servirá como apoyo en la validación y mejora de técnicas de diseño sísmico, facilitando los procesos de análisis y optimizando los tiempos de trabajo, con la intención de lograr respuestas más rápidas y precisas. Además, se busca representar de manera más cercana a la realidad la degradación que sufren las columnas de hormigón armado bajo cargas cíclicas, incorporando parámetros que reflejen la pérdida de rigidez y la reducción de resistencia a lo largo de los ciclos. Esto permitirá contar con una herramienta más confiable y útil, tanto en el ámbito académico como en el profesional.

# CAPITULO 1: MARCO TEÓRICO

## **Comportamiento sísmico de las estructuras de hormigón armado.**

### Importancia del estudio del comportamiento sísmico en estructuras de hormigón armado.

Analizar el comportamiento sísmico de las estructuras compuestas de hormigón armado es fundamental para obtener una garantía de la seguridad de las estructuras y su resiliencia cuando se encuentran bajo constante movimiento sísmico. Las cargas dinámicas se desencadenan debido a eventos sísmicos, que en varias ocasiones suelen exceder la elasticidad que se ha considerado en los trabajos de diseño de los diferentes elementos estructurales. En estas circunstancias, es necesario que la infraestructura pueda mantenerse bajo control de las deformaciones inelásticas que se presentan, logrando evadir que se ocasionen colapsos inmediatos y protegiendo las vidas humanas en juego. (Priestley, Seible, & Calvi, 1996)

Actualmente, en la ingeniería se considera el diseño por ductilidad, el cual demanda que las estructuras no solo estén diseñadas para resistir las cargas, sino disponer de la capacidad de disipar eficientemente la energía por medio de deformaciones plásticas. (Paulay & Priestley, 1992)

### Mecanismo de respuesta del hormigón armado bajo cargas cíclicas.

Se conoce que el hormigón tiene mantiene un buen comportamiento cuando se trata de cargas a compresión, sin embargo, cuando se trata de cargas a tensión o cargas reiterativas se convierte en un elemento inestable y puede presentar fisuraciones inmediatas. Por otro lado, el acero de refuerzo ofrece contención de energía y características dúctiles, no obstante, puede fatigarse y atenuar la adherencia bajo cargas cíclicas graves (Mander, Priestley, & Park, 1988). En el transcurso de múltiples acontecimientos sísmicos, se logra determinar en los materiales un decrecimiento de rigidez, la cual transforma directamente a la estructura y su respuesta ante las cargas. (Paulay & Priestley, 1992)

El análisis de los mecanismos tangibles que regulan el comportamiento sísmico de las estructuras de hormigón armado es primordial para la comprensión de su actuación

bajo cargas dinámicas. Este apartado se compone de cuatro secciones importantes: (Priestley, Seible, & Calvi, 1996)

- Fisuración en conjunto de formación de rótulas plásticas.
- Disipación energética e histéresis.
- Factores de reforzamiento para reformar la ductilidad.
- Producto de la degradación cíclica.

La correlación entre el hormigón y acero de refuerzo produce el comportamiento llamado “pinch-in” el cual genera ciclos que someten cargas y descansar, la relación asimétrica en las curvas fuerza vs desplazamiento y la pérdida de rigidez. Estos artilugios actúan determinadamente en parámetros necesarios para evaluar el comportamiento post-sísmico y si es necesario un diseño de intervención en los elementos como rigidez residual, disipación de energía y ductilidad. (Priestley, Seible, & Calvi, 1996)

#### *Fisuración en conjunto de formación de rótulas plásticas.*

En el sismo, la respuesta de las columnas de hormigón armado se desarrolla desde un régimen elástico inicial hacia un estado inelástico, produciendo fisuras y deformaciones plásticas localizadas en zonas críticas. Estos puntos suelen transformarse en rótulas plásticas, permitiendo la redistribución de esfuerzos y la disipación de energía sin que se produzca una pérdida repentina de la resistencia. Este comportamiento se manifiesta mediante curvas fuerza–desplazamiento, caracterizadas por ciclos de carga y descarga definidos. (Mander, Priestley, & Park, 1988)

El refuerzo de acero proporciona ductilidad a la estructura; sin embargo, bajo estas sollicitaciones puede presentar fatiga y pérdida de adherencia, disminuyendo progresivamente la capacidad de disipar energía. La fisuración del concreto, especialmente cuando no existe un confinamiento adecuado, permite un comportamiento no lineal, requiriendo una modelación detallada para lograr un análisis más realista (Mander, Priestley & Park, 1988).

#### *Amortiguamiento cíclico y degradación de rigidez.*

El comportamiento que se presenta durante un movimiento sísmico en columnas de hormigón armado principalmente es el decrecimiento de la rigidez. Esto se produce por medio de las fisuraciones generadas en el hormigón y los deslizamientos en el acero,

aminoran la capacidad del elemento para volver a obtener su forma luego de que se le aplica el ciclo de cargas. Implicando un incremento de deformaciones resultantes de cargas subsiguientes, aumentando las demandas de la infraestructura y dificultando el presagio del resultado. (Priestley, Seible, & Calvi, 1996)

A su vez, este ciclo ocasiona un cambio en el amortiguamiento; en áreas de fisuraciones, como consecuencia del efecto de histéresis inicialmente se aumenta la disipación de la energía, pero posteriormente logra disminuir en las áreas donde el daño es definitivo y desorbitante. Consecuentemente el amortiguamiento deteriora sus propiedades, produciendo un aumento en la intensidad de las oscilaciones y elevación en desplazamientos laterales, lo cual provoca riesgos de que la estructura colapse. (Priestley, Seible, & Calvi, 1996)

#### *Importancia de la modelación analítica y sus aplicaciones prácticas.*

La relevancia de abarcar estos fenómenos en su correcta representación de los comportamientos tanto elástico, plástico y de degradación que puede presentar el hormigón armado, se convierte en sustancial para:

- Diseño sísmico moderno. Incluye el diseño bajo el uso de la capacidad dúctil, mediante el dimensionamiento se puede disipar la energía y se consideran detalles en la construcción adecuados al diseño. (Priestley, Seible, & Calvi, 1996)
- Valoración de edificios actuales. Tiene como función principal, evaluar los posibles daños de gran impacto y proyectar acciones de tratamiento, reparación o medida de refuerzo. (Priestley, Seible, & Calvi, 1996)
- Mejora de modelos numéricos. En herramientas como OpenSeesPY es necesario ingresar datos realistas de los parámetros tales como las relaciones tensión y deformación, el grado de degradación y la rigidez inicial, para lograr una simulación correcta del comportamiento dinámico de la estructura con respecto a la variable del tiempo. (Mander, Priestley, & Park, 1988) (Zhu, McKenna, & Scott, 2018)

### Ensayos pseudo estáticos y el vínculo con la dinámica real.

#### *Fundamentos de los ensayos pseudo estáticos.*

Los ensayos pseudo estáticos se emplean para dar respuestas a diversas cargas cíclicas bajo el comportamiento sísmico en una estructura. Entre los parámetros a considerar está el desplazamiento, cargas que se aplican para obtener simulaciones aproximadas durante un terremoto. Este tipo de ensayo no genera afectaciones por dinámica real ni aplica fuerzas inerciales, sin embargo, conceden la captación de curvas de carga vs desplazamiento, las cuales se consideran útiles para analizar la ductilidad, capacidad de dispersión de energía y su rigidez residual (Saatçioğlu & Özcebe, 1989). De igual modo, los ensayos pseudo estáticos favorecen la valoración de parámetros como mecanismos de falla, pandeo local y desarrollo de rótulas plásticas y fisuras (Takiguchi, 1980)

#### *Limites ante respuestas dinámicas reales.*

A pesar de su uso y sus diversas funciones, los ensayos tienen límites, debido a que no pueden mostrar durante un sismo la presentación de acontecimientos dinámicos en la estructura. Los más relevantes sucesos deficientes son: (Carrillo & Alcocer, 2013)

Carencia de efectos inerciales: No se evalúa la colaboración de las cargas de masa ni las interacciones que ocurren en los diferentes modos de vibración.

Amortiguamiento idealizado: A causa de los efectos histeréticos acumulativos pueden generar una captura incorrecta o no se logra obtenerla en el amortiguamiento su degradación progresiva.

Interacción modal: No se puede realizar la simulación de forma realista de los desplazamientos multiaxiales ni los modos de vibración.

Dado que los resultados obtenidos alcanzan a reducir de manera excesiva el comportamiento real de la estructura, se deberá derivar en otros aspectos tales como subvalores la demanda sísmica. (Carrillo & Alcocer, 2013)

#### *Comparación entre respuestas de ensayos pseudo estáticos y dinámica real.*

Las respuestas obtenidas en la dinámica real de estructuras que se someten a cargas sísmicas logran vincular fenómenos como la heterogeneidad en la carga axial, acumula las deformaciones no reversibles y exige una degradación del

amortiguamiento. Esta información se puede evaluar mediante el análisis de la ejecución de historia de tiempo y el comportamiento adaptado de las estructuras reales o bajo simulaciones avanzadas (Fu, Nakamura, Furuhashi, & Yamamoto, 2016)

Según (Li, Zhao, Liang, Lv, & Zhao, 2016) se ha logrado demostrar mediante sus investigaciones que las columnas de hormigón armado que se han deteriorado en eventos sísmicos precedentes captan una reducción en la capacidad de disipar energía generando una rigidez inicial y ductilidad inferior. Efectos como estos son captados idóneamente mediante ensayos pseudo estáticos, lo cual destaca y enfatiza la necesidad de incorporar modelos donde se evalúe el daño acumulado en las estructuras y los efectos no lineales en el análisis dinámico que se presenta.

*Capacidad de ensayos pseudo-estáticos como base para modelos numéricos.*

Los ensayos pseudo estáticos tienen la capacidad de ser utilizados como indicador experimental para lograr calibrar y verificar modelos de uso analítico. Estos ensayos adaptan parámetros constitutivos que se obtienen mediante curvas de fuerza-desplazamiento identificadas y las cuales se utilizan para definirlos como modelos consistentes del comportamiento estructural (Paultre, Proulx, Mousseau, Prévost, & Savard, 2008).

Adicionalmente, la recopilación de datos que se generan mediante los ensayos se incorpora a simulaciones dinámicas y se integran los efectos, se examina el amortiguamiento que se presenta durante eventos sísmicos, con el transcurso del tiempo y su crecimiento de rigidez (Carrillo & Alcocer, 2013).

Los registros dinámicos ofrecen parámetros importantes como la masa, amortiguamiento modal y la rigidez, los cuales se emplean para calibrar modelos estructurales y poder optimizar la seguridad y credibilidad de los modelos predictivos ante posibles terremotos (Paultre, Proulx, Mousseau, Prévost, & Savard, 2008).

De este modo, la interacción de estos ensayos con la construcción de modelos analíticos, la cual brinda herramientas esenciales para lograr la comprensión del comportamiento de estructuras, sujetas a condiciones sísmicas y se consideran destacables para el desarrollo estratégico de diseños competentes, con un correcto reforzamiento y de ser necesario rehabilitaciones que se efectúan según modelos confiables y pruebas empíricas. (Paultre, Proulx, Mousseau, Prévost, & Savard, 2008)

## **OpenSeesPY**

En esta investigación se desarrollará un modelo analítico programado en el lenguaje Python, el cual facilitará los procesos de ajuste y calibración del modelo para obtener los resultados esperados.

El programa OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), creado como un proyecto por la Universidad de California en la década de 1990, surgió con el propósito de realizar simulaciones avanzadas de estructuras y sistemas geotécnicos expuestos a cargas sísmicas. En este proyecto se desarrolló el programa dejando su uso para futuras investigaciones y habilitando una mejora continua.

Para el desarrollo del programa se usó el lenguaje de programación de la época, C++, el cual era popular por su simpleza y facilidad al momento de realizar operaciones sencillas. Posteriormente, surgió un nuevo lenguaje de programación: Python, el cual se popularizó en la comunidad científica y motivo que se adapte el programa al nuevo a OpenSeesPy, generando una interfaz que conecta el motor de cálculo de OpenSees con Python. Este cambio resulta de gran importancia, ya que permite la integración del análisis estructural con librerías de cómputo científico (McKenna, Fenves, & Scott, 2024).

### **Capacidades de modelado**

En el desarrollo del modelo se implementaron diferentes repertorios en OpenSeesPy, los cuales brindan un catálogo de modelos que permiten representar distintos materiales y su comportamiento. Para el caso del hormigón, se analizaron varios modelos que van desde concrete01 hasta concrete07, diferenciándose por sus propiedades mecánicas y los criterios de daño de cada uno. En el caso del acero de refuerzo, se trabajó principalmente con steel01 y steel02, los cuales permiten representar de forma adecuada la respuesta de los materiales frente a esfuerzos sísmicos.

Adicionalmente, se integraron otros modelos complementarios, entre los cuales destaca el material Hysteretic, el cual es responsable de representar la degradación de la rigidez y la resistencia bajo cargas repetidas. De esta forma, la columna puede generar una respuesta realista al ser sometida a condiciones sísmicas, al incorporar tanto las

propiedades físicas de los materiales como los efectos de degradación causados por los sismos.

Para la elaboración de esta investigación se implementarán diversos tipos de modelos en Python, con el fin de obtener un código que permita recrear los resultados deseados. Se realizará una calibración en función de los modelos más acordes a la investigación y se descartarán aquellos que no se adapten a la misma.

A continuación, se presentan descripciones de consideraciones de modelación empleadas:

### Concrete07

El modelo está inspirado en estudios recientes, donde el comportamiento del hormigón representa una respuesta que toma en cuenta sus características físicas y mecánicas (Zhang, Sun, & Bai, 2023). Se caracteriza por abarcar de manera completa los diversos cambios que ocurren en los elementos de hormigón armado al estar sometidos a cargas cíclicas, entre los cuales destacan:

- Degradación por daño
- Asimetría en la histéresis (causada por las diferencias en tracción y compresión).
- Reducción de rigidez y resistencia por acumulación de energía o deformación.

Para la adaptación en Python, se trabaja con el siguiente código y sus respectivos parámetros (OpenSeesPY, 2025):

```
uniaxialMaterial('Concrete07', matTag, fc, epsc, Ec, ft, et, xp, xn, r)
```

- **matTag**: Identificador del material.
- **fc**: Resistencia a compresión (negativa).
- **epsc**: Deformación correspondiente a fc.
- **Ec**: Módulo de elasticidad inicial.
- **ft**: Resistencia a tracción (positiva).
- **et**: Deformación correspondiente a ft.
- **xp**: Punto de inicio del descenso de la curva en tracción (valor adimensional).

- **xn**: Punto de inicio del descenso de la curva en compresión (valor adimensional).
- **r**: Parámetro de forma de la rama descendente.

### Hysteretic

Se utilizará Hysteretic en el modelo desarrollado, ya que permite analizar la capacidad de los materiales para conservar los efectos de cargas aplicadas anteriormente, guardando un registro en el elemento, el cual estará sometido a bucles característicos que reflejan la disipación de energía y la degradación del material. Esto permitirá obtener un análisis realista al considerar las sollicitaciones cíclicas de carga y descarga, similares a las ondas generadas por un sismo (Deng, Zhang, & Sun, 2023).

Para el modelo de histéresis en Python aplicamos el siguiente código:

```
uniaxialMaterial('Hysteretic', matTag, *p1, *p2, *p3=p2, *n1, *n2, *n3=n2,
pinchX, pinchY, damage1, damage2, beta=0.0)
```

En este caso se incorporan nuevos parámetros que participan en el modelo, los cuales son capaces de describir el comportamiento que experimentará nuestra columna en la mesa sísmica. Dichos parámetros se definen de la siguiente forma:

- matTag: Identificador del material.
- p1, p2, p3: Puntos de la curva positiva.
- n1, n2, n3: Puntos de la curva negativa.
- pinchX, pinchY: Factores de pinzamiento.
- damage1, damage2: Parámetros de daño.
- beta: Parámetro opcional.

Se puede notar la complejidad del modelo y cómo este resulta más completo en comparación con otros, al considerar características como la tracción, el comportamiento cíclico, el daño acumulativo, la histéresis y su aplicabilidad en la verificación de un diseño sismorresistente (OpenSeesPy, 2025).

### FiberSection

El modelo FiberSection se fundamenta en investigaciones recientes que han optimizado la discretización en fibras para representar el comportamiento no lineal de secciones de hormigón armado sometidas a cargas sísmicas. En investigaciones anteriores se señala que la correcta definición de las fibras permite capturar de manera precisa la interacción entre el concreto y el acero, así como los efectos de confinamiento y degradación cíclica (Zhang, Zhou, & Li, 2024).

Por otra parte, se validó la aplicabilidad de la sección de fibras en simulaciones sísmicas, demostrando que su implementación en OpenSeesPY reproduce de forma confiable la curva esfuerzo–deformación de columnas de hormigón armado (Wang, Liu, & Chen, 2023).

Su adaptación en Python tiene el siguiente código, en donde se desglosan los materiales que intervienen en el modelo. Asimismo, se considera el armado del elemento y la cantidad de refuerzo, lo que permite definir cómo estará conformada la sección:

```
section('Fiber', secTag, '-GJ', GJvalue)
```

La sección Fiber se define mediante:

```
fiber(x, y, A, matTag)
```

- **x,y** = coordenadas de la fibra
- **A** = área de la fibra
- **matTag** = material uniaxial (se definen los materiales)

Para su sección geométrica tenemos una columna circular entonces aplicamos el siguiente código que nos ayuda a representar la forma circular del modelo:

```
patch('circ', matTag, numRadial, numCirc, centerX, centerY, innerRadius, outerRadius, startAng, endAng)
```

- **matTag** = ID del material (ej. Concrete01, Concrete07, etc.)
- **numRadial** = Número de divisiones radiales (del centro hacia afuera)
- **numCirc** = Número de divisiones angulares (alrededor del círculo)
- **centerX, centerY** = Coordenadas del centro del círculo

- innerRadius = Radio interno (0 para sólido)
- outerRadius = Radio externo de la sección
- startAng = Ángulo de inicio (grados)
- endAng = Ángulo final (grados)

Por último, para las barras de acero longitudinales se aplica el siguiente código, que permite definir las varillas dispuestas a lo largo de la columna:

```
layer('circ', matTag, numBars, barArea, centerX, centerY, radius, startAng, endAng)
```

- 'circ' = Tipo de distribución: círculo o arco
- matTag = ID del material del acero
- numBars = Número total de barras en la capa circular
- barArea = Área de cada barra
- centerX, centerY = Coordenadas del centro del círculo
- radius = Radio donde se colocan las barras
- startAng = Ángulo inicial de distribución (en grados)
- endAng = Ángulo final de distribución (en grados)

En este modelo se representa un aspecto muy importante al considerar la sección mediante fibras, lo cual permitirá que el material se comporte de manera uniforme. Además, se incluyen varios parámetros que posibilitan un análisis más preciso, al tomar en cuenta diversos factores adicionales (OpenSeesPY, 2025).

### *ForceBeamColumn*

Este modelo se ha utilizado en investigaciones recientes sobre la representación adecuada del comportamiento no lineal en vigas y columnas, especialmente en la formulación de rótulas plásticas y en el ablandamiento localizado que puede generarse (Li, Zhang, & Chen, 2024). Se propone un método actual que permita simular con realismo la plastificación localizada y la degradación cíclica, lo cual posibilita presentar de manera completa el comportamiento de la columna ensayada.

Su representación en **Python** está dada mediante el siguiente código y sus respectivos parámetros:

```
element('forceBeamColumn', tag, iNode, jNode, transfTag, integrationTag, '-mass', mass)
```

- **tag** = Identificador único del elemento
- **iNode, jNode** = Nodos inicial y final del elemento
- **transfTag** = Transformación geométrica (por ejemplo, lineal o P- $\Delta$ )
- **integrationTag** = Método de integración (Lobatto, Radau, etc.)
- **-mass** = Masa por unidad de longitud (opcional)

Para la adaptación al modelo en Python, se utiliza un código que depende de otros modelos complementarios, los cuales permiten lograr una sincronía entre sí. Estos varían en función de los tipos de materiales, los modelos de integración de la columna, la distribución geométrica, entre otros aspectos, los cuales se desglosan a continuación (OpenSeesPY, 2025).

### Lobatto

Este modelo de integración ha sido adoptado ampliamente en el análisis estructural no lineal, principalmente por su capacidad de ubicar puntos de integración en los extremos de los elementos, donde se concentran las deformaciones plásticas. En investigaciones recientes (Gao, Li, & Xu, 2023) se introdujo un enfoque basado en la integración de bisagras plásticas, zonas en las que la viga o columna sufre una deformación permanente al aplicarse una carga muy grande, lo que permite obtener una respuesta no lineal más realista.

Es necesario colocar puntos de integración en los extremos de los elementos, donde los momentos flectores son más significativos al no existir cargas internas, mejorando así la precisión de los resultados del comportamiento no lineal.

Algunas de las aplicaciones de este modelo en la ingeniería estructural son:

- Análisis sísmico a estructuras de hormigón armado
- Evaluación de capacidad de carga y ductilidad de los elementos

- Diseños de elementos con plasticidad distribuida

Para su adaptación en OpenSeesPy, se emplea el siguiente código con sus respectivos parámetros:

```
beamIntegration('Lobatto', tag, secTag, N)
```

- **tag:** Identificador único para la integración.
- **secTag:** Etiqueta de la sección transversal del elemento.
- **N:** Número de puntos de integración.

Este modelo se implementa para la integración de bisagras plásticas al momento de definir elementos mediante el modelo ForceBeamColumn, lo cual sirve como apoyo para la integración correcta del elemento frente a las reacciones producidas por cargas sísmicas.

El uso de este modelo de integración de bisagras plásticas aporta en diversos análisis estructurales, tales como:

- **Simular el comportamiento no lineal:** permite representar la respuesta de elementos estructurales bajo cargas extremas.
- **Optimización de diseños:** facilita el diseño de elementos estructurales al considerar la distribución de esfuerzos y deformaciones.
- **Evaluación de la capacidad de carga y ductilidad:** posibilita medir la capacidad de los elementos frente a las deformaciones generadas por cargas sísmicas.

### NewtonCotes

Inspirada en los trabajos de Isaac Newton y Roger Cotes a principios del siglo XVIII, esta metodología aproximaba integrales definidas mediante la evaluación de la función en puntos equidistantes a través de una interpolación polinómica. En Python, se utiliza para integrar las respuestas de secciones por fibras en los elementos viga-columna.

En OpenSeesPy, esta metodología se aplica mediante el siguiente código y sus respectivos parámetros:

`beamIntegration('NewtonCotes', integTag, secTag, nPts)`

- **integTag**: identificador del esquema de integración
- **secTag**: etiqueta de la sección
- **nPts**: número de puntos de integración

Este enfoque facilita la integración uniforme a lo largo de la sección del elemento, mejorando la resolución de las respuestas internas bajo cargas cíclicas y garantizando una mayor robustez computacional (Savvides & Tsotoulidi, 2025).

### Rayleigh

Se introdujo el concepto de energía disipada en sistemas vibratorios y la relación del amortiguamiento como una forma de fuerza proporcional a la velocidad. Sin embargo, estudios recientes han señalado que este modelo mantiene una razón de amortiguamiento casi constante solo en un rango limitado de frecuencias, lo que podría afectar la precisión en el análisis de estructuras complejas (Nakamura, 2024).

En la actualidad, estos conceptos se han retomado y aplicado a la ingeniería estructural de forma digital mediante la computación, con el fin de representar el amortiguamiento en análisis dinámico a través de la combinación de la masa y la rigidez, conocido como “damping de Rayleigh”.

Para su implementación en Python, se utiliza la siguiente adaptación en el código:

```
rayleigh(alphaM, betaK, betaKinit=0.0, betaKcomm=0.0)
```

- $\alpha_M = \alpha_M$
- $\beta_K = \beta_K$  aplicado a la rigidez tangente
- $\beta_{Kinit}$ ,  $\beta_{Kcomm}$  = opcionales, aplican a rigidez inicial o comprometida

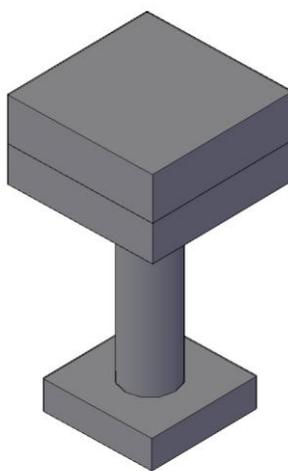
Este modelo busca representar el amortiguamiento viscoso lineal para considerar la reducción de movimientos la cual van a presentar sus propios materiales (OpenSeesPY, 2025).

## Modelo

Para el desarrollo de la investigación se tomó en cuenta un ensayo realizado por el Tutor de este trabajo en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), en el cual se utilizó una mesa vibradora para simular los sismos y analizar el comportamiento del hormigón armado.

### Espécimen

De la misma forma, se elaboró la recreación del espécimen ensayado, el cual está constituido por una masa en la parte superior que actúa como carga, soportada por la columna de hormigón armado, y una zapata en la base que funciona como el soporte del elemento, Ilustración 1.



*Ilustración 1. Espécimen recreado en AutoCAD. Autoría Propia.*

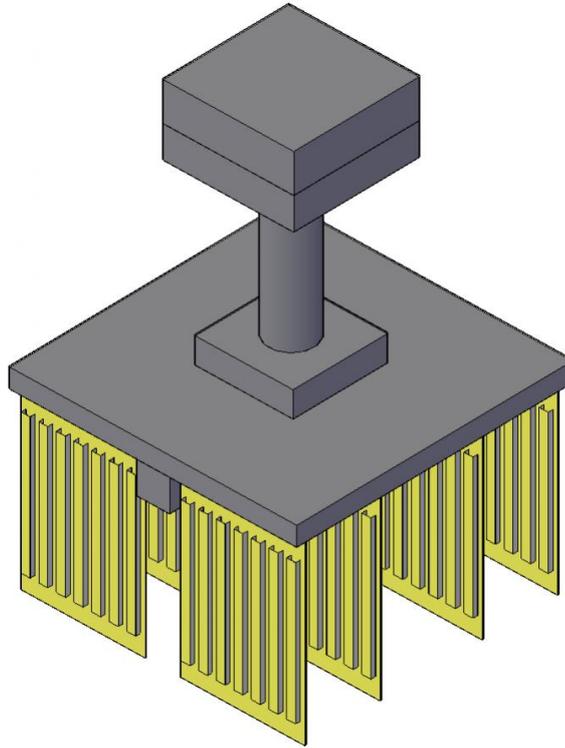
Además, cumple con las siguientes medidas geométricas y con los valores de peso correspondientes, *Tabla 1*, los cuales se obtuvieron durante la realización del estudio:

*Tabla 1. Características del espécimen (Ponce, 2022)*

Elemento	Tipo de sección	Dimensiones	Altura	Peso
Masa	Cuadrada	2,00X2,00m	1,10m	110.00 kN
Columna	Circular	D=0,35m	2,40m	5,77 kN
Zapata	Cuadrada	1,40X1,40m	0,50m	19,60 kN
			Peso total del espécimen	135,37 kN

Al colocar el espécimen ensayado en la mesa vibradora se obtiene una noción clara de cómo se llevó a cabo el ensayo, Ilustración 2. Para ello, se combinaron los

elementos en AutoCAD con el fin de obtener una representación gráfica del ensayo realizado.



*Ilustración 2. Representación 3D del ensayo. Autoría propia*

### **Eventos sísmicos**

Para el desarrollo de este trabajo, se emplearon los sismos usados en los ensayos: Japón 2011 y Chile 2010 los cuales son eventos de gran magnitud con altas aceleraciones y múltiples daños generados para sus sectores.

#### *Japón 2011*

Terremoto de Tohoku, Japón, del 11 de marzo de 2011, alcanzó una magnitud de 9.0 Mw, siendo uno de los más poderosos registrados a nivel mundial. Se caracterizó por altas aceleraciones del suelo y una compleja liberación de energía, generando adicionalmente un Tsunami que afectó la zona costera. Desde el punto de vista estructural, este evento permitió analizar el desempeño de las estructuras frente a demandas sísmicas extremas. Su importancia radica en la diversidad de movimientos registrados, que han sido usados ampliamente en la investigación para calibrar y validar modelos analíticos no lineales (Motosaka, 2012).



*Ilustración 3. (Britannica, Escenas de devastación tras el terremoto y tsunami de Tohoku, 2011)*

### Chile 2010

El segundo evento sísmico seleccionado fue el terremoto del Maule, Chile, del 27 de febrero de 2010, alcanzó una magnitud de 8.8 Mw y es considerado uno de los más fuertes registrados en la historia reciente. Tuvo una duración prolongada (aproximadamente 3 minutos) y liberó una gran cantidad de energía, provocando intensas aceleraciones del suelo y amplias réplicas posteriores. El evento causó graves daños en infraestructura de hormigón armado y puentes, revelando vulnerabilidades en estructuras diseñadas bajo normativas anteriores. Este sismo es relevante porque mostró cómo los efectos acumulativos de cargas cíclicas prolongadas pueden comprometer la rigidez y resistencia de las estructuras (USGS, 2011).



*Ilustración 4. (Britannica, Edificio colapsado en Concepción tras el terremoto de Maule, 2010)*

## CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO

Para el desarrollo del trabajo se aplicó un enfoque experimental-computacional, debido a las diversas operaciones que deben realizarse tanto en el programa de codificación como en las modificaciones y adaptaciones del modelo dentro del mismo software. El proceso partió de un registro obtenido previamente, con el fin de lograr una respuesta lo más cercana posible a la realidad, apoyándose en recursos previamente utilizados, como la aproximación bayesiana.

### **Procesamiento de datos**

Antes de comenzar el proceso de calibración, fue necesario filtrar las series temporales mediante un filtro Butterworth, utilizando el método zero-phase a través de la función `filtfilt` de SciPy, con el fin de eliminar los ruidos de alta y baja frecuencia. Este tipo de filtros es ampliamente utilizado en el procesamiento de señales experimentales debido a su interacción estable y suave con el rango de frecuencias.

### **Modelo numérico de la columna**

Para el desarrollo de la columna se seleccionó el modelo basado en fuerzas con sección de fibras, el cual, dadas sus características previamente descritas, resulta ideal para el comportamiento que se busca analizar, pues ha demostrado un desempeño superior frente a formulaciones concentradas (Gao, Li, & Xu, 2023). Asimismo, se implementó el modelo Newton-Cotes, que facilita la integración numérica de los esfuerzos (Fernández, 2023).

En cuanto a los materiales, se emplearon los modelos teóricos de Mander, Priestley y Park (1988) para el hormigón, con su respectiva adaptación en Python, y para el acero se utilizó el modelo clásico de Menegotto y Pinto (1973), cuyas características son más completas para el análisis del caso estudiado. Ambos modelos han sido revisados en aplicaciones modernas (Ritto-Campos, Campos, & Beck, 2022). (Ritto-Campos, Campos, & Beck, 2022).

El modelo también incorpora el amortiguamiento de Rayleigh, que combina términos de masa y rigidez. Este se aplicó de manera que pueda incluirse en estudios de sensibilidad, aunque no se consideró en la corrida base. Este tipo de amortiguamiento se profundiza en detalle en el análisis dinámico no lineal (Ghahari, 2024).

## **Cargas, condiciones de borde**

En un inicio, se aplicó únicamente el estado de gravedad mediante un análisis estático controlado. Posteriormente, se ejecutó un análisis transitorio utilizando el método de integración de Newmark ( $\gamma = 0.5$ ,  $\beta = 0.25$ ). Este esquema es incondicionalmente estable en el rango lineal y ampliamente empleado en análisis no lineales (MOOSE Framework, 2024). Para recrear los movimientos generados por ondas sísmicas, se aplicaron desplazamientos en los apoyos a través de la definición de “Time series” y “Pattern transient”, los cuales permiten reproducir registros experimentales.

## **Ajustes y métricas de Validación**

La calibración del modelo se realizó mediante una métrica espectral, obtenida a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) de los registros de desplazamientos. Con ello se minimizó la diferencia entre los espectros simulados y experimentales. Este tipo de calibraciones ha demostrado ser eficaz en procesos de identificación y ajuste estructural (Sedehi, Papadimitriou, & Katafygiotis, 2022).

Adicionalmente, se validaron los lazos históricos fuerza–desplazamiento y las derivas, a fin de compararlos con los resultados experimentales.

## **Calibración Bayesiana (ABC-SubSim)**

En particular, (Barros, Chiachio, Chiachio, & Cabanilla, 2021) propusieron un método de calibración adaptativa basado en Approximate Bayesian Computation (ABC) y Subset Simulation, diseñado específicamente para estructuras con un gran número de parámetros y ensayos dinámicos. Este proceso resulta ventajoso en nuestra investigación por la cantidad de variantes a calibrar, principalmente por los diversos valores que se obtienen de las columnas ante cargas sísmicas, donde la variación de los parámetros genera una ineficiencia al representar adecuadamente el comportamiento observado en los ensayos. Según los autores, la combinación de ABC y Subset Simulation aligera el costo computacional y mejora la convergencia con respecto a técnicas clásicas de inferencia bayesiana.

En el análisis transitorio se empleó un paso de integración base, acompañado de un algoritmo que ajustaba automáticamente el paso ( $\Delta t/10$ ) cuando se presentaban problemas de convergencia. Este procedimiento garantiza la estabilidad numérica durante la calibración, permitiendo reintentar la solución hasta evitar fallos, práctica recomendada en el análisis incremental–relativo (Vakilzadeh, Beck, & Abrahamsson, 2017).

Resumiendo, al momento de aplicar la aproximación bayesiana en la calibración de modelos estructurales podemos: incrementar la precisión de las simulaciones analíticas, mejorar la confiabilidad del diseño y además optimizar los procesos de evaluación y reforzamiento estructural. De esta forma, podemos establecer un vínculo entre los ensayos realizados y el modelo desarrollado, lo cual mejora el comportamiento sísmico al cual se quiere llegar y a la incorporación de la degradación por parte de los elementos ensayados (Yuen, 2010; Barros, Chiachio, Chiachio, & Cabanilla, 2021).

### **Validación del modelo**

La validación del modelo se llevó a cabo comparando los resultados numéricos con los experimentales, considerando los desplazamientos nodales y el contenido espectral de las señales. Estas comparaciones se fundamentan en criterios de identificación estructural basados en inferencia bayesiana y calibración estadística de modelos (Kurumbhati, 2024).

Adicionalmente, se contó con el apoyo de diversas librerías científicas estándar (Zhu, McKenna, & Scott, 2018), que resultaron de gran utilidad para agilizar los cálculos, integrar los diferentes comportamientos de la columna analizada y adaptar la composición del elemento al cálculo realizado. Asimismo, se generaron gráficas que permitieron representar de manera clara y eficiente los resultados obtenidos, evidenciando la influencia de los parámetros empleados.

### **Proceso de Calibración**

En una primera etapa de calibración se determinaron los valores iniciales de los parámetros que gobiernan el comportamiento constitutivo de los materiales empleados en el modelo. Estos parámetros, una vez ajustados, se fijaron con el fin de reducir el

número de variables libres en las calibraciones posteriores y así concentrar el análisis en los parámetros de mayor influencia sobre la respuesta dinámica.

La obtención de estos valores fundamentales permitió establecer un punto de partida sólido para la siguiente etapa de calibración, ya que se trabajó con materiales de comportamiento estable. Este procedimiento garantizó que la optimización se enfocara en la respuesta sísmica, mejorando tanto la estabilidad numérica como la eficiencia computacional del análisis dinámico.

Para la segunda etapa de calibración, se enfocó en las variaciones presentadas por tres parámetros claves: amortiguamiento, masa y rigidez. A diferencia de la primera fase, en la cual se definieron valores fijos para los modelos de materiales, en este caso se establecieron rangos de búsqueda que permitieron ajustar las propiedades dinámicas del sistema mediante un proceso de calibración estadística.

## CAPÍTULO 3: RESULTADOS

Mediante los procesos de calibración realizados fue posible establecer parámetros fijos y confiables para los materiales empleados en el modelo. Este procedimiento no solo permitió reducir la cantidad de variables, sino también garantizar que los materiales considerados presenten un comportamiento coherente y representativo frente a las condiciones de carga analizadas. Se obtuvieron los siguientes valores, los cuales servirán como referencia en el desarrollo de los análisis posteriores y en la validación del modelo estructural:

PARÁMETROS	
CONCRETE07 - UC	
XP	2.000
XN	2.300
R	2.520
CONCRETE07 - CC	
XP	2.000
XN	30.070
R	3.588
HYSTERETIC	
PINCH X	0.10
PINCH Y	0.900
DAMAGE 1	2.34E-02
DAMAGE 2	1.09E-01
BETA	0.02

Tabla 2. Parámetros Fijos. Autoría Propia.

El amortiguamiento se trabajó dentro de un intervalo comprendido entre 0.600 y 0.800, valores que corresponden a coeficientes efectivos capaces de representar la disipación de energía en el rango de vibración dominante de la estructura. Por su parte, el parámetro de rigidez se definió con límites inferiores y superiores de 0.001 y 0.005, respectivamente, con el propósito de capturar la variación de la rigidez efectiva durante el análisis dinámico no lineal. Finalmente, la masa se calibró en un rango entre  $1.50 \times 10^{10}$  y  $1.90 \times 10^{10}$ , lo cual permitió considerar la incertidumbre asociada a la estimación de la inercia total de la columna ensayada.

## Resultados del Modelo – Japón 2011

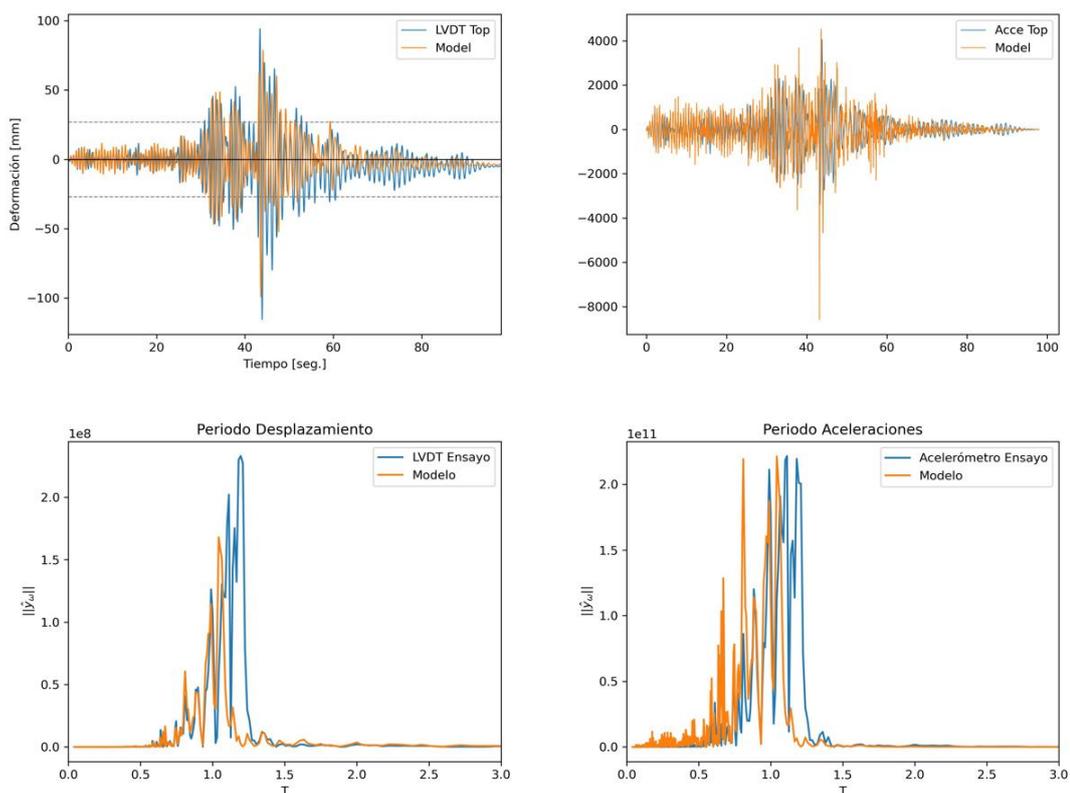


Ilustración 5. Gráficas de resultados del Modelo – Japón 2011. Autoría Propia.

En la gráfica se muestran las comparaciones entre los registros experimentales del sismo de Japón 2011 y los resultados obtenidos con el modelo calibrado. En el gráfico que se observa del lado superior izquierdo, se encuentra representado el desplazamiento medido con LVDT y el simulado con el modelo, se puede observar que el modelo genera una aceptable similitud como respuesta general, especialmente en la fase inicial y en el rango principal de la vibración. Sin embargo, se logran identificar diferencias en los valores más altos, debido a que el ensayo pudo alcanzar desplazamientos cercanos a los 100 mm, de este modo el modelo graficó valores ligeramente inferiores, lo que lleva a sugerir que el sistema numérico tiene a subestimar las deformaciones en los extremos.

En el gráfico superior derecho, relacionado con las aceleraciones, la respuesta del modelo se aproxima en gran medida a las mediciones, manteniendo una tendencia coherente en la fase de mayor energía (entre 35 y 50 segundos). Aun así, en ciertos intervalos el modelo presenta sobreestimación de amplitudes, lo que indica limitaciones en la representación del amortiguamiento real durante el evento.

Respecto al análisis en el dominio de frecuencias, Ilustración 6, se aprecia que tanto en el caso de desplazamientos como en el de aceleraciones, el modelo logra identificar los periodos dominantes de la estructura. Sin embargo, se puede evidenciar pequeñas deformaciones en los picos espectrales, en particular en el primer modo, en donde el modelo no coincide completamente con la respuesta experimental. Este comportamiento afirma que, el modelo logra capturar adecuadamente las tendencias globales dinámicas en la estructura, pero persisten desigualdades significativas en la precisión de los periodos, en la zona de resonancia específicamente.

### Resultados del Modelo – Japón 2011 y Chile 2010

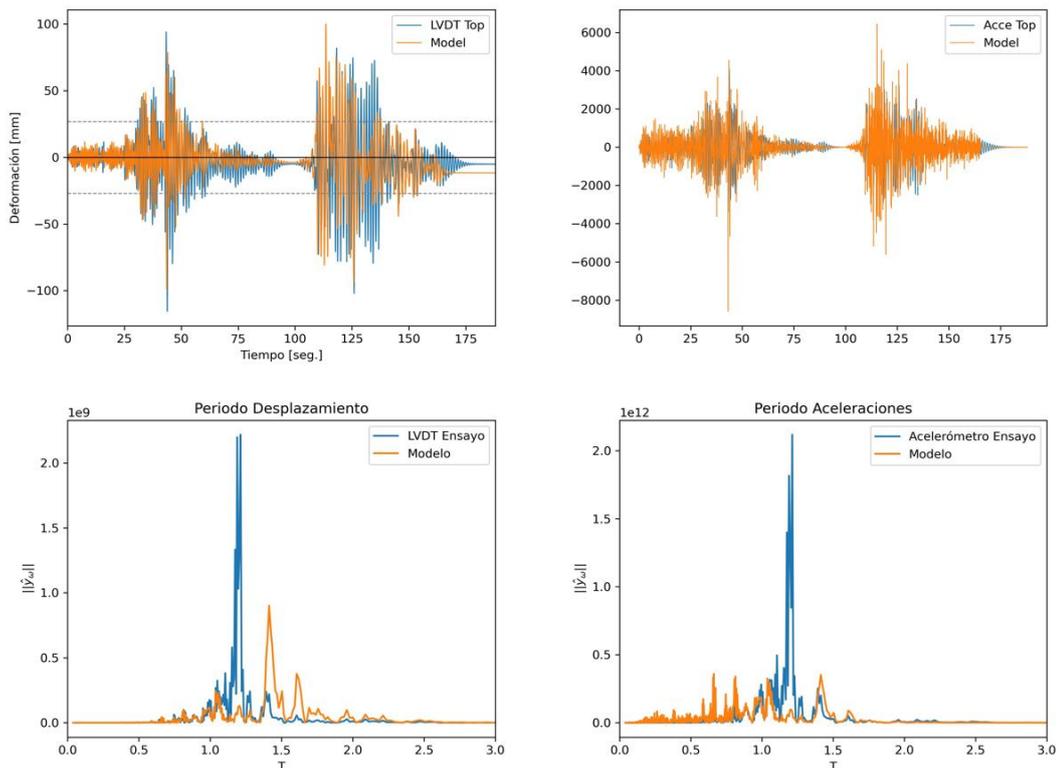


Ilustración 6. Gráficas de resultados del Modelo – Japón 2011 y Chile 2010. Autoría Propia.

En la gráfica se presentan las comparaciones entre los resultados experimentales obtenidos durante por la aplicación consecutiva de los registros sísmicos de Japón 2011 y Chile 2010 frente a la respuesta del modelo calibrado. En el gráfico superior izquierdo, correspondiente al desplazamiento registrado con el LVDT y el estimado por el modelo, se aprecia que la simulación logra reproducir adecuadamente la tendencia general de la respuesta estructural. Cabe recalcar, que se logran observar discrepancias en las máximas deformaciones, debido a que el modelo se inclina hacia la subestimación de

desplazamientos más extremos, en especial en las partes donde se registra mayor energía.

En el gráfico que se encuentra ubicado en la parte superior derecha se demuestra las aceleraciones en donde se puede observar una concordancia aceptable entre las dos señales, específicamente en la fase en donde se registró la máxima intensidad. Sin embargo, se pueden identificar episodios en el modelo en donde se sobreestima varias amplitudes, lo cual se puede considerar que está vinculado con una representación simplificada de la rigidez no lineal o del amortiguamiento en el sistema del modelo. El análisis en el dominio de las frecuencias, como se observa en la Ilustración 7, evidencia que, las deformaciones y aceleraciones, son identificadas por el modelo debido a sus períodos predominantes de la estructura. Cabe destacar, que los picos espectrales presentaron desfase con respecto a los resultados experimentales que se obtuvieron, lo cual demuestra limitaciones en la predicción del modelo en el primer modo de vibración. Los resultados demuestran que el modelo puede capturar de manera sensata la parte dinámica global estructural y en la localización precisa de los períodos característicos.

## CONCLUSIONES

En este trabajo los modelos constitutivos seleccionados, Concrete07 para el concreto y Hysteretic para el acero, lograron reproducir con regular fidelidad los principales procesos que caracterizan la respuesta del hormigón armado bajo cargas sísmicas, como la degradación del concreto, la plastificación del acero, la pérdida de rigidez y la disipación de energía a través de ciclos histéricos. Sin embargo, aunque el modelo logró representar de forma aproximada los desplazamientos máximos del primer ensayo realizado, no consiguió representar con buena exactitud la evolución de la respuesta dinámica en el siguiente sismo. Esto se puede evidenciar en el análisis del terremoto de Chile de 2010, ya que los períodos de vibración calculados mediante el modelo mostraron diferencias significativas en relación con los resultados esperados.

La aplicación del modelo en los eventos ensayados permitió comprobar el comportamiento del hormigón armado ante condiciones sísmicas constantes. Aunque se logró reproducir de manera aceptable la respuesta del hormigón armado ante los eventos ensayados, el segundo análisis realizado, Chile 2010, mostro irregularidades evidentes en el comportamiento de la columna, principalmente en su periodo. Entendiendo así que, aunque el modelo puede representar de manera aproximada los desplazamientos, su ajuste no es directamente transferible de un registro sísmico a otro, especialmente cuando se trata de movimientos prolongados o con distinta distribución de energía.

La calibración basada en técnicas bayesianas fue determinante para obtener un ajuste cercano entre los desplazamientos simulados y los medidos en laboratorio, lo que respalda la confiabilidad del modelo para evaluar demandas de deformación en columnas de hormigón armado. Sin embargo, es necesario revisar nuevas calibraciones para los diversos parámetros que influyen directamente al comportamiento de la columna, ya que generar una variación considerable con respecto a los registros obtenidos. A pesar de estas limitaciones, la metodología desarrollada constituye un aporte válido para el análisis no lineal y sienta las bases para futuras mejoras en la representación del comportamiento sísmico de estructuras de hormigón armado.

## **RECOMENDACIONES**

Se necesita tener en cuenta que los resultados pueden variar por los múltiples factores que influyen directamente al momento de realizar los ensayos, lo cual complica replicar de forma eficiente el comportamiento del hormigón armado ante eventos sísmicos. Algunos de los factores que influyen son: las propiedades del material, la intensidad del movimiento, la duración del sismo. Por este motivo, se recomienda analizar una mayor cantidad registros que permitan analizar diferentes escenarios y, de esta forma, obtener conclusiones más eficientes que puedan representar mejor la realidad

Se recomienda el uso de distintos modelos de materiales, los cuales tienen diferentes comportamientos, como Concrete02 o Fatigue, ya que podrían representar un comportamiento más realista del hormigón armado en secuencias sísmicas. Explorar nuevas alternativas permitiría comprobar si el modelo se adapta de mejor forma ante diversos escenarios, los cuales deben tomar en cuenta los procesos de degradación y la resistencia del material a lo largo de los eventos sísmicos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Au, S. K., & Beck, J. L. (2001). *Estimation of small failure probabilities in high dimensions by subset simulation*. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 16(4), 263–277. Obtenido de [https://doi.org/10.1016/S0266-8920\(01\)00019-4](https://doi.org/10.1016/S0266-8920(01)00019-4)
- Barros, J., Chiachio, M., Chiachio, J., & Cabanilla, F. (2021). Adaptive approximate Bayesian computation by subset simulation for structural model calibration. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 37(6), 726-745. doi:10.1111/mice.12762
- Obtenido de <https://opensees.github.io/OpenSeesDocumentation/user/manual/model/beamIntegration.html>
- Beaumont, M., Cornuet, J.-M., Marin, J.-M., & Robert, C. (2009). Adaptive approximate Bayesian computation. *Journal of the Royal Society Interface*, 6(39), 983-990. doi:10.1098/rsif.2008.0172
- Beck, J. L., & Au, S. K. (2002). *Bayesian updating of structural models and reliability using Markov chain Monte Carlo simulation*. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(4), 380–391. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(2002\)128:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(2002)128:4(380))
- Beck, J. L., & Katafygiotis, L. S. (1998). *Updating models and their uncertainties. I: Bayesian statistical framework*. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(4), 455–461. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1998\)124:4\(455\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:4(455))
- Britannica (Dirección). (2010). *Edificio colapsado en Concepción tras el terremoto de Maule* [Película].
- Britannica (Dirección). (2011). *Escenas de devastación tras el terremoto y tsunami de Tohoku* [Película].
- Carrillo, J., & Alcocer, S. M. (2013). *Experimental investigation on dynamic and quasi-static behavior of low-rise reinforced concrete walls*. *Earthquake Engineering*

& *Structural Dynamics*, 42(4), 635–652. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/eqe.2234>

Chan, Y., & Zhang, Q. (2007). Adaptive filtering of physiological signals. *Journal of Biomechanics*, 40(15), 3500-3506. doi:10.1016/j.jbiomech.2006.12.006

Chiachio, J., Beck, J. L., & Chiachio, M. (2014). *Approximate Bayesian computation by subset simulation*. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 36(3), A1339–A1358. . Obtenido de <https://doi.org/10.1137/130920022>

Chiachio, M., Beck, J., & Chiachio, J. (2014). Approximate Bayesian computation by subset simulation. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 36(3), A1339-A1358. doi:10.1137/130920022

Chopra, A. (2020). *Dynamics of structures: Theory and applications to earthquake engineering (5th ed.)*. Pearson.

Chowdhury, I., & Dasgupta, S. (2003). Computation of Rayleigh damping coefficients for large systems. *Computers & Structures*, 81(12), 1195-1211. doi:10.1016/S0887-3801(02)00088-3

Cumulative fatigue damage evaluation method for reinforcing bars under variable-amplitude strain histories. (2020). 210, 110385. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110385

De Domenico, D., Messina, D., & Recupero, A. (2023). Seismic vulnerability assessment of reinforced concrete bridge piers with corroded bars. *Structural Concrete*, 24, 56–83.

Deng, Y., Zhang, J., & Sun, J. (2023). A hysteretic model of reinforced concrete bridge piers considering strength and stiffness degradation. *Engineering Structures*, 284, 115651. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115651>

Feng, Z., Zhang, X., & Coaut. (2025). Hysteresis model for flexure–shear critical circular reinforced concrete columns considering cyclic degradation. *Buildings*, 15(14).

Fernández, J. (2023). Beam-column element deformations solved using Newton-Cotes integration points.

- Fu, L., Nakamura, H., Furuhashi, H., & Yamamoto, Y. M. (2016). *Mechanism of shear strength degradation of a reinforced concrete column subjected to cyclic loading*. *Structural Concrete*, 18(1), 177–188. . Obtenido de <https://doi.org/10.1002/suco.201600052>
- Gao, Y., Li, P., & Xu, Z. (2023). Improved Gauss–Lobatto integration scheme for nonlinear beam–column elements under seismic loading. *Engineering Structures*, 297, 116287. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116287>
- Ghahari, F. (2024). Quantification of modeling uncertainty in the Rayleigh damping model. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*.
- Huang, J., Wang, S., & Chen, L. (2024). Comparative study of Gauss, Radau and Lobatto integration schemes for force-based beam–column elements under cyclic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 181, 109876. doi:<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2024.109876>
- Kennedy, M., & O’Hagan, A. (2001). Bayesian calibration of computer models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)*, 63(3), 425–464. doi:10.1111/1467-9868.00298
- Kurumbhati, M. (2024). Hierarchical Bayesian inference for calibrating material model parameters in structural engineering.
- Li, X., Zhao, Z.-H., Liang, Y.-S., Lv, H.-L., & Zhao, Z.-H. (2016). *Cyclic behaviour of earthquake- and corrosion-damaged RC columns*. *Magazine of Concrete Research*, 68(13), 723–740. Obtenido de <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00155>
- Li, Y., Zhang, T., & Chen, X. (2024). Improved integration method for force-based beam-column elements considering cyclic degradation. *Journal of Constructional Steel Research*, 210, 107394. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.107394>
- Low-cycle fatigue life of reinforcing bars under seismic-type strain histories. (2019). 197, 109389. doi:10.1016/j.engstruct.2019.109389

- Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). *Theoretical stress–strain model for confined concrete*. *Journal of Structural Engineering*, 114(8), 1804–1826. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1988\)114:8\(1804\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804))
- Marin, J.-M., Pudlo, P., Robert, C., & Ryder, R. (2012). Approximate Bayesian computational methods. *Statistics and Computing*, 22(6), 1167–1180. doi:10.1007/s11222-011-9288-2
- McKenna, F., Fenves, G., & Scott, M. (2024). Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) [Software and Documentation]. Obtenido de <https://opensees.berkeley.edu/>
- Modeling of cyclic shear–flexure interaction in reinforced concrete structural walls. Part I: Theory. (2015). *141*(5). doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001059
- MOOSE Framework. (2024). Newmark time integration for structural dynamics: unconditionally stable with  $\gamma = 0.5$ ,  $\beta = 0.25$ . *MOOSE Documentation*.
- Motosaka. (2012). Building damage during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. *Engineering Structures*.
- Nakamura, N. (2024). Frequency-independent damping models for a high-rise building: Limitations of Rayleigh damping. *Frontiers in Built Environment*.
- OpenSeesPY. (8 de 9 de 2025). *Fiber Section*. Obtenido de OpenSeesPYDoc: <https://openseespydoc.readthedocs.io/en/latest/src/fibersection.html>
- OpenSeesPY. (8 de 9 de 2025). *forceBeamColumn*. Obtenido de OpenSeesPYDoc: <https://openseespydoc.readthedocs.io/en/latest/src/ForceBeamColumn.html>
- OpenSeesPy. (8 de 9 de 2025). *Hysteretic uniaxial material*. Obtenido de OpenSeesPYDoc: <https://openseespydoc.readthedocs.io/en/latest/src/Hysteretic.html>
- OpenSeesPY. (8 de 9 de 2025). *Rayleigh command*. Obtenido de OpenSeesPYDoc: <https://openseespydoc.readthedocs.io/en/latest/src/reyleigh.html>
- OpenSeesPY. (8 de 9 de 2025). *uniaxialMaterial Concrete07*. Obtenido de OpenSeesPYDoc:

<https://openseespydoc.readthedocs.io/en/latest/src/uniaxialMaterial.html#uniaxialmaterial-concrete07>

- Papadimitriou, C., & Lombaert, G. (2012). *The effect of prediction error correlation on optimal sensor placement in structural dynamics*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 28, 105–127. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2011.06.018>
- Park, R., Kent, D., & Sampson, R. (1972). Reinforced concrete members with cyclic loading. *Journal of the Structural Division*, 98(7), 1341-1360.
- Park, Y.-J., & Ang, A. H.-S. (1985). *Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete*. *Journal of Structural Engineering*, 111(4), 722–739. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1985\)111:4\(722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1985)111:4(722))
- Paulay, T., & Priestley, M. J. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/9780470172841>
- Paultre, P., Proulx, J., Mousseau, S., Prévost, T., & Savard, C. (2008). *Pseudo-dynamic and forced vibration tests of a full-size two-story reinforced high-performance concrete building*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(5), 627–649. . Obtenido de <https://doi.org/10.1139/L08-097>
- Ponce, G. (2015). *Informe de Evaluación de Mesa Vibradora*. Lima.
- Priestley, M. J., Seible, F., & Calvi, G. M. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. John Wiley & Sons. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/9781118805075>
- Quarteroni, A., Sacco, R., & Saleri, F. (2000). *Numerical mathematics (2nd ed.)*. Springer. doi:10.1007/978-3-642-97651-0
- Ritto-Campos, D., Campos, R., & Beck, J. (2022). Hysteretic models in nonlinear dynamic analysis of structures: A review. *Frontiers in Built Environment*, 8, 1048533. doi:10.3389/fbuil.2022.1048533
- Saatçioğlu, M., & Özcebe, G. (1989). *Hysteretic shear model for reinforced concrete members*. *Journal of Structural Engineering*, 115(1), 132–150. Obtenido de [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:1\(132\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:1(132))

- Savvides, A., & Tsotoulidi, V. (2025). An improvement for the Euler-Bernoulli fiber force-based beam through Simpson Integration. *Acta Mechanica*, 236(7).
- Scott, M., & Fenves, G. (2006). Plastic hinge integration methods for force-based beam–column elements. *Journal of Structural Engineering*, 132(2), 244-252. doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:2(244)
- Sedehi, O., Papadimitriou, C., & Katafygiotis, L. (2022). Hierarchical Bayesian uncertainty quantification of finite element models using modal statistical information. *Bayesian Analysis*.
- Shen, J., Chen, B., & Sun, G. (2024). Hysteresis model of RC column considering cumulative damage effect under variable axial load. *Buildings*, 14, 3219. doi:https://doi.org/10.3390/buildings14103219
- Takiguchi, K. e. (1980). *Standardized test configurations for cyclic loading of reinforced concrete columns (en el contexto de la publicación revisada)*. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, Article 5. Obtenido de <https://doi.org/10.1186/2008-6695-5-4>
- USGS. (2011). Report on the 2010 Chilean Earthquake and Tsunami Response. U.S. Geological Survey. *U.S. Geological Survey*.
- Vakilzadeh, M., Beck, J., & Abrahamsson, T. (2017). Using approximate Bayesian computation by subset simulation for efficient posterior assessment of dynamic state-space model classes. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 40(6).
- Wang, H., Liu, J., & Chen, Y. (2023). Fiber section modeling for seismic performance analysis of reinforced concrete columns. *Engineering Structures*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116486>
- Wang, S., Lignos, D., & Wang, W. (2024). Uniaxial material model with softening for simulating the cyclic behavior of steel tubes in concrete-filled steel tube beam-columns. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. doi:https://doi.org/10.1002/eqe.4204
- Yu, S., Zhang, Y., Bie, J., Zhang, W., Jiang, J., Chen, H., & Chen, X. (2023). Finite Element Analysis of Hysteretic Behavior of Superposed Shear Walls Based on

OpenSEES. *Buildings*, 13(6). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/buildings13061382>

Yuen, K. V. (2010). *Bayesian methods for structural dynamics and civil engineering*. John Wiley & Sons. Obtenido de <https://doi.org/10.1002/9780470824573>

Zhang, G., Sun, B., & Bai, W. (2023). Hysteretic model for RC columns based on effective hysteretic energy dissipation with positive and negative directions. *Buildings*, 13(5). Obtenido de <https://doi.org/10.3390/buildings13051140>

Zhang, L., Zhou, X., & Li, Q. (2024). Enhanced fiber discretization for reinforced concrete sections under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 211, 107512. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2024.107512>

Zhang, Y., McKenna, F., & Fenves, G. (2019). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees framework. *SoftwareX*, 10, 100288. doi:10.1016/j.softx.2019.100288

Zhou, J., Liu, H., & Wang, Y. (2023). Seismic response analysis of reinforced concrete beam-columns with plastic hinge length consideration. *Engineering Structures*, 295, 116134. doi:<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116134>

Zhou, Y., Wang, J., Li, X., & Zhao, Y. (2023). Advanced hysteretic models for steel materials under cyclic loading: Improvements and applications in seismic analysis. *Engineering Structures*.

Zhu, M., McKenna, F., & Scott, M. H. (2018). OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework. *SoftwareX*, 7, 6-11. doi:10.1016/j.softx.2017.10.009

Zhu, M., McKenna, F., & Scott, M. H. (2018). *OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework*. *SoftwareX*, 7, 6–11. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.softx.2017.10.009>

## ANEXOS

```
# -*- coding: utf-8 -*-  
  
from scipy import stats  
  
import openseespy.opensees as ops  
  
import numpy as np  
  
import time  
  
import scipy.signal as scp  
  
import itertools as itto  
  
import matplotlib.pyplot as plt  
  
import pickle  
  
import pandas  
  
import vfo.vfo as vfo  
  
import opsvis as opsv  
  
import scipy.integrate  
  
from numpy.fft import fft  
  
from scipy.signal import butter, lfilter  
  
  
prstfac = 0.1  
  
  
def f_alpha(alpha):  
  
    muw1 = 0.4
```

```

stdw1 = 0.1

fval = np.exp(-(alpha-muw1)**2/(2*stdw1**2))

return fval

def f_tol2(g, p_0, p_0i, epsilon_0, epsilon_f, n_param):

    epsiloni = []

    N = len(g)

    nt = int(np.round(N*p_0))

    nti = np.round(N*p_0i)

    for i in range(np.size(nti)):

        auxdist = g[int(nti[i]), n_param]

        epsiloni.append(auxdist)

    maxepsilon = np.max(epsiloni)

    minepsilon = np.min(epsiloni)

    epsilon = g[nt, n_param]

    f = 1.0 - (epsilon - minepsilon)/(maxepsilon - minepsilon)

    return f

def ABCSS(g_ordenada, sigma, p_0, n_param, L, U, N, gRe, indices_parap0,
g_parap0):

    prstfac = 0.1

```

```

nt = int(np.round(N*p_0))

ns = int(np.ceil(1/p_0 -1))

contador = 0

conta_elec = 0

num_tol = N

g_i = g_ordenada

longi = nt + 1

conta_parap0 = 0

for i in range(nt):

    semilla = g_i[i, :]

    for j in range(ns):

        contador = contador + 1

        u = np.zeros(n_param)

        for k in range(n_param):

            done = 0

            while done == 0:

                if k == 11:

                    prstfac = 10** -10

                elif k == 1 or k == 2:

                    prstfac = 10** -5

                u[k] = semilla[k] + np.random.randn()*prstfac*sigma[k]

                prstfac = 0.1

            if u[k] >= L[k] and u[k] <= U[k]:

```

```
done = 1
```

```
if i in indices_parap0 and j == 0:
```

```
    g_temp = g_parap0[conta_parap0]
```

```
    contador = contador - 1
```

```
    conta_parap0 = conta_parap0 + 1
```

```
else:
```

```
    g_temp = modelo_equivalente(u)[1]
```

```
if g_temp <= g_ordenada[nt, n_param]:
```

```
    g_i[longi, :] = np.append(u, g_temp)
```

```
    conta_elec = conta_elec + 1
```

```
else:
```

```
    g_i[longi, :] = g_i[i, :]
```

```
semilla = g_i[longi, range(n_param)]
```

```
longi = longi + 1
```

```
if longi >= N:
```

```
    break
```

```
if longi >= N:
```

```
    break
```

```

g_ordenada = g_i[g_i[:, n_param].argsort()]

sigma = np.std(g_ordenada[:, range(n_param)],0)

gRe = np.append(gRe,np.array(g_ordenada[0:], ndmin = 2), axis=0)

num_tol = num_tol + N - nt

max_sigma = np.max(sigma)

toleval = g_ordenada[nt, n_param]

ratio_elec = float(conta_elec) / contador

return g_ordenada, max_sigma, sigma, ratio_elec, gRe, contador, toleval,
conta_parap0

def parap0(g_i, N, p_0, n_param, sigma,L,U,nn):

    prstfac = 0.1

    contador = 1

    conta_elec = 0

    nt_i = int(np.floor(N*p_0))

    nt_ip0 = int(np.round(N*nn))

    ns = int(1)

    rho = g_i[nt_i, n_param]

    indices = np.random.choice(nt_i, nt_ip0, replace = False)

    indices = indices[indices[:].argsort()]

```

```

g_i = g_i[indices]

g_temp = np.zeros(N)

for i in range(nt_ip0):

    semilla = g_i[i, :]

    for j in range(ns):

        contador = contador + 1

        u = np.zeros(n_param)

        for k in range(n_param):

            done = 0

            while done == 0:

                if k == 11:

                    prstfac = 10**.-10

                elif k == 1 or k == 2:

                    prstfac = 10**.-5

                u[k] = semilla[k] + np.random.randn()*prstfac*sigma[k]

                prstfac = 0.1

                if u[k] >= L[k] and u[k] <= U[k]:

                    done = 1

            g_temp[contador - 1] = modelo_equivalente(u)[1]

        if g_temp[contador - 1] <= rho:

            semilla = g_temp[contador - 1]

            conta_elec = conta_elec + 1

alpha = float(conta_elec) / contador

```

```

w1 = f_alpha(alpha)

return alpha, w1, contador, g_temp, indices

### Modelo

# unidades MPa, N y mm

d_t=0.02

AceleBase = Registros["A1(g)m"] # aceleración input

acc_test1 = Registros["A4(g)m"] # aceleración registrada arriba

Tiempo= Registros["Tiempo"] # tiempo total registro

acc_nofilter = AceleBase *-9810

acc_test = acc_test1 *9810

AceleracionRegistro = AceleBase *-9810

d_testpuntocontrolD1 = Registros["D1r(mm)m"]

numerodatos1= len(acc_test)

numerodatos2=numerodatos1*Longituddatos

numerodatos=round(numerodatos2)

T=round(numerodatos*d_t)

```

```
fs = 1/d_t

lowcut=0.1

highcut=10

nyq = fs/2

low = lowcut / nyq

high = highcut / nyq

order = 4

n = T/fs

b, a = butter(order, [low,high], btype='band')

acc = lfilter(b, a, acc_nofilter)

acc = acc[1:ll+1]

d_test = d_testpuntocontrol

d_test = d_test[:ll]

suma = np.sum(np.abs(d_test))

y3_i = np.fft.fft(d_test)

y3 = (y3_i.real**2 + y3_i.imag**2)

x3 = np.fft.fftfreq(len(d_test),d_t)
```

```

def
genera_seccion_HA(section_tag,UC_tag,CC_tag,RS_tag,R,rec,fc,Kcc,Es,fy,alpha,fi,n
o_fi,teta,fu,fcc,Ec,Ecc,ecc,ft,ect,eco):

    ops.uniaxialMaterial('Concrete07', UC_tag, -fc, -eco, Ec, ft, ect, 2.0, 2.3, 2.520)

    ops.uniaxialMaterial('Concrete07', CC_tag, -fcc, -ecc, Ecc, ft, ect, 2.0, 30.07, 3.588)

    M1 = fy; M2 = fu

    teta1 = M1/Es; teta2 = 0.12

    ops.uniaxialMaterial('Hysteretic', RS_tag, M1,teta1,M2,teta2,-M1,-teta1,-M2,-teta2,
0.10, 0.90, teta[0], teta[1], 0.02)

    ops.section('Fiber',section_tag)

    ops.patch('circ', UC_tag, 12, 1, 0, 0, R-rec, R, -15, 345)

    ops.patch('circ', CC_tag, 12, 10, 0, 0, 0, R-rec, -15, 345)

    ops.layer('circ', RS_tag, no_fi, fi**2*np.pi/4, 0, 0, R-rec)

```

```

def modelo_equivalente(teta):

```

```

    fc = 23

    eco = 0.0015+(fc/70000)

    fc1=12

    ec1=0.0036

    esp = 0.012-0.0001*fc

    Ec = 4700*(fc**(0.5))

    P1 = 110000

    R = 175

```

```

fi = 12

no_fi = 12

rec = 25

A_fi = fi**2*np.pi/4

fy = 460*1.045

fu = 737

Es = 200000

sspiral = 30

fspiral = 4.2

Asp=np.pi*((fspiral/2)**2)

Dc = 2*(R-rec)+fspiral

sp = sspiral

rcc = (fi**2)*no_fi/(Dc**2)

ke = (1-sp/2/Dc)/(1-rcc)

pi_value = np.pi

rs= 4*Asp/(Dc*sp)

rs1 = pi_value*(fspiral**2)/Dc/sp

fpl = (1/2.0)*ke*rs*fy

Kcc = (-1.254 + 2.254 * ((1 + 7.94 * (fpl / fc))**(0.5)) - 2 * (fpl / fc))

fcc = fc*Kcc

ecc = eco * (1 + 5 * (Kcc - 1))*1.0

Ecc= 4700*((fc*Kcc)**(0.5))

fcu = 12 + fc*(Kcc-1)

```

$ecu = 5 * ecc$

$ef = 0.004 + ecu$

$ft = 0.625 * ((fc)**(0.5)) * 1.24$

$ect = 0.1 * eco$

$ft1 = ft / 3$

$deff = R-rec$

`ops.model('basic', '-ndm', 2, '-ndf', 3)`

`ops.node(0, 0.0, 0.0)`

`ops.node(1, 0.0, 0.0)`

`ops.node(2, 0.0, 400)`

`ops.node(3, 0.0, 1200)`

`ops.node(4, 0.0, 2400)`

`ops.node(5, 0.0, 2950)`

`ops.mass(5, 11.22, 0.0, 0.0)`

`ops.fix(0, 1, 1, 1)`

`ops.fix(1, 1, 1, 0)`

ops.uniaxialMaterial('Elastic', 10, 1.681e+10)

ops.element('zeroLength', 5, 0, 1, '-mat', 10, '-dir', 3)

genera\_seccion\_HA( 1, 2, 3, 4,R,rec,fc, Kcc,Es,fy,0.001,fi,  
no\_fi,teta,fu,fcc,Ec,Ecc,ecc,ft,ect,eco)

ops.geomTransf('PDelta', 1)

ops.beamIntegration('NewtonCotes', 1, 1, 3)

ops.beamIntegration('NewtonCotes', 2, 1, 5)

ops.beamIntegration('NewtonCotes', 3, 11, 3)

ops.element('forceBeamColumn', 1, 1, 2, 1, 1)

ops.element('forceBeamColumn', 2, 2, 3, 1, 2)

ops.element('elasticBeamColumn', 3, 3, 4, 96211, Ec, 640.07e+6, 1)

ops.element('elasticBeamColumn', 4, 4, 5, 4000000, Ec, 1333e+9, 1)

ops.timeSeries('Linear', 1)

ops.pattern('Plain', 1, 1)

ops.load(5, 0.00, -P1, 0.0)

```

ops.constraints('Plain')

ops.numberer('RCM')

ops.system('UmfPack')

ops.integrator('LoadControl', 0.0001)

ops.test('EnergyIncr', 1.0e-4, 200)

ops.algorithm('Newton')

ops.analysis('Static')

A=ops.analyze(100)

ops.loadConst('-time',0.0)

ops.wipeAnalysis()

if A==0:

    print("OK")

ops.timeSeries('Path', 2, '-dt',d_t,'-values',*acc,'-prependZero')

ops.pattern('UniformExcitation', 2, 1,'-accel',2)

ops.system('BandGeneral')

ops.numberer('RCM')

ops.constraints('Plain')

ops.test('EnergyIncr', 1e-8, 20, 0)

ops.algorithm('KrylovNewton')

ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25)

ops.analysis('Transient')

```

```

asup, d = [], []

for i in range(11):

    ops.test('NormDispIncr', 1.0e-3, 200)

    ok = ops.analyze(1,d_t)

    if ok != 0:

        # break

        ops.test('NormDispIncr', 1.0e-3, 500)

        ok = ops.analyze(10,d_t/10)

        if ok!= 0:

            # break

            ops.test('NormDispIncr', 1.0e-2, 500)

            ok = ops.analyze(10,d_t/10)

            if ok != 0:

                ops.test('NormDispIncr', 1.0e-2, 500)

                ok = ops.analyze(20,d_t/20)

                if ok != 0:

                    break

asup.append(ops.nodeAccel(5,1))

```

```

d.append(ops.nodeDisp(5,1))

if i == ll:

    y4_i = np.fft.fft(d)

    y4 = (y4_i.real**2 + y4_i.imag**2)

    metrica = np.sum(np.abs(y3-y4))/suma**2

else:

    metrica = 10**11

ops.wipe()

return asup, metrica, d

def prueba(nnn):

    nn = 0.02 # nn*N es el numero de evaluaciones utilizadas para definir p_0

    N = Nm

    p_0 = 0.5

    p_0std = 0.75*p_0

    n_param = 2

    maxi_try = 10

    tolerance = 0.1

```

```

L = list([ 0.015, 0.800])

U = list([ 0.050, 0.205])

g = np.zeros(shape = (N, n_param + 1))

for i in range(n_param):

    g[:, i] = np.random.uniform(L[i],U[i],N)

for i in range(N):

    g[i, n_param] = modelo_equivalente(g[i,0:-1])[1]

g_ordenada = g[g[:,n_param].argsort()]

gRe = np.array(g_ordenada[0, :], ndmin = 2)

sigma = np.std(g_ordenada[:, range(n_param)],axis=0)

epsilon_0 = g_ordenada[ N-1 , n_param]

r_elec = np.zeros(maxi_try)

ACC_Interm_SS = np.zeros(shape = (maxi_try + 1 , N , n_param + 1 ))

ACC_Interm_SS[0 , : ] = g_ordenada

n_pruebas = 3

w_acc = np.zeros((maxi_try, n_pruebas , 3))

```

```

alpha_acc = np.zeros((maxi_try, n_pruebas , 1))

alpha_used_acc = np.zeros((maxi_try, 1))

p0i_acc = np.zeros((maxi_try, n_pruebas , 1))

p_0_used_acc = np.zeros((maxi_try, 1))

ww_used_acc = np.zeros((maxi_try, 1))

cuenta_eval = 0

ahorro = 0

for i in range(maxi_try):

    alpha = np.zeros(n_pruebas)

    w1 = np.zeros(n_pruebas)

    w2 = np.zeros(n_pruebas)

    indices = np.zeros((n_pruebas,int(np.round(N*nn)),1))

    p_0i = stats.truncnorm.rvs(a=(0.1 - p_0)/p_0std, b=(0.5-p_0)/p_0std,

                               loc = p_0, scale = p_0std, size = n_pruebas)

    p0i_acc[i,:,0] = p_0i

    g_temp = np.zeros((n_pruebas,N,1))

    for jj in range(n_pruebas):

        alpha[jj], w1[jj], n_evaluaciones, g_temp[jj,:,0], indices[jj,:,0] =
parap0(g_ordenada, N, p_0i[jj], n_param, sigma,L,U,nn)

        w2[jj] = f_tol2(g_ordenada, p_0i[jj] , p_0i , epsilon_0, tolerance,n_param)

```

```
cuenta_eval = cuenta_eval + n_evaluaciones
```

```
w1min = np.min(w1)
```

```
w1max = np.max(w1)
```

```
w1 = (w1 - w1min)/(w1max - w1min)
```

```
w_acc[i,:,0] = w1
```

```
w_acc[i,:,1] = w2
```

```
w_acc[i,:,2] = w1*w2
```

```
alpha_acc[i,:,0] = alpha #MCR: Accumula el ratio de aceptación
```

```
ii = np.argmax(w1*w2)
```

```
p_0 = p_0i[ii]
```

```
alpha_used = alpha[ii] #MCR: Obtiene el valor del r. aceptación finalmente usado
```

```
alpha_used_acc[i] = alpha_used
```

```
p_0_used_acc[i] = p_0
```

```
ww_used_acc[i] = w_acc[i, ii, 2]
```

```
indices_parap0 = indices[ii,:,0]
```

```
g_parap0 = g_temp[ii,:,0]
```

```
g_ordenada, maxsigma, sigma, r_elec[i], gRe, contador, toleval, c =  
ABCSS(g_ordenada, sigma, p_0, n_param, L, U, N, gRe, indices_parap0, g_parap0)
```

```
cuenta_eval = cuenta_eval + contador
```

```
ahorro = ahorro + c
```

```
print('#####')
```

```
print('#####')
```

```
print('#####')
```

```
print('SUBSET ' + str(i) + ' TERMINADO')
```

```
print('#####')
```

```
print('#####')
```

```
print('#####')
```

```
print('#####')
```

```
if toleval <= tolerance:
```

```
    break
```

```
ACC_Interm_SS[i + 1, :] = g_ordenada
```

```
return i, cuenta_eval, alpha_used_acc, p_0_used_acc, ww_used_acc,  
p0i_acc,ACC_Interm_SS, ahorro
```

```
t0 = time.time()
```

```

i, cuenta_eval, alpha_used_acc, p_0_used_acc, ww_used_acc,
p0i_acc,ACC_Interm_SS, ahorro = prueba(1)

tf = time.time()

NNN=str(len(ACC_Interm_SS[0]))

Subset=str(i)

aa = [i, cuenta_eval, alpha_used_acc, p_0_used_acc, ww_used_acc,
p0i_acc,ACC_Interm_SS, ahorro]

pickle.dump(aa,open(archivosresultado,'wb'))

print('#####')

print('modelo')

p = ACC_Interm_SS[10,0,:]

NNNN=len(ACC_Interm_SS[0])

numeracionn=np.linspace(0,NNNN-1,NNNN)

numeroparametros=len(p)

parametrosssss=ACC_Interm_SS[i,:,:]

Subset1=str(i)

for ggg in range (numeroparametros-1):

    parametro1=parametrosssss[:,ggg]

    parametro=parametro1[:-1]

    plt.figure()

```

```
plt.plot(numeracionn,parametro, linestyle='-')

sggg=str(ggg)

paratitulo='Par_Theta_' + sggg

plt.title(paratitulo)

# plt.close()

archivosparametros = paratitulo + CaracteristicaCorrida

fileEspec= archivosparametros+'.jpg'

plt.savefig(fileEspec,dpi=300)

plt.show
```

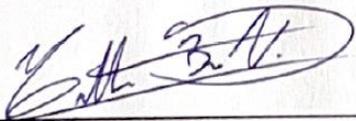
## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Balón Vera, Cristhian Saúl** con C.C: # **2450386764** y **Moreira Peñafiel Amy Geomayra** con C.C: # **0940427842** autores del trabajo de titulación: **Desarrollo de un modelo analítico de columna de hormigón armado que considere la degradación frente a eventos sísmicos**, previo a la obtención del título de **Ingeniero/a Civil** en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro 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.

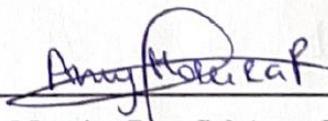
2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **08 de septiembre de 2025**

f. 

**Balón Vera, Cristhian Saúl**

**C.C. 2450386764**

f. 

**Moreira Peñafiel Amy Geomayra**

**C.C. 0940427842**

**REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN**

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Desarrollo de un modelo analítico de columna de hormigón armado que considere la degradación frente a eventos sísmicos.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Cristhian Saúl, Balón Vera – Amy Geomayra, Moreira Peñafiel		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Guillermo Alfonso, Ponce Vásquez		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Ingeniería		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Civil		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniero/a Civil		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	08 de septiembre de 2025	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	58
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Ingeniería sísmica y dinámica estructural; Mecánica de materiales y comportamiento no lineal; Metodologías de calibración y validación.		
<b>PALABRAS CLAVES/ KEYWORDS:</b>	Hormigón armado; Comportamiento sísmico; OpenSeesPy; Calibración bayesiana; Modelos constitutivos; Degradación estructural.		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>	<p>Se presenta el desarrollo de un modelo analítico de columnas de hormigón armado sometidas a las solicitaciones sísmicas, implementado el software OpenSeesPy con la finalidad de analizar los diversos efectos dinámicos y la progresiva degradación de los elementos estructurales. Para su construcción se emplearon conceptos de no-linealidad en los materiales y se emplearon modelos constitutivos, tales como Concrete07 para el concreto y Hysteretic para el acero, efectos de segundo orden mediante P-Delta y amortiguamiento Rayleigh. El modelo fue calibrado utilizando un enfoque de aproximación bayesiana, lo que permitió ajustar parámetros en función de datos experimentales obtenidos previamente y con registros sísmicos reales. Entre los registros sísmicos utilizados para el trabajo está el de Japón 2011 y Chile 2010, estos sismos fueron seleccionados por sus características de intensidad y duración. Aunque en los resultados se obtuvo tendencias en los desplazamientos y deformaciones, estas no mostraban similitudes altas con los ensayos realizados. Entre las diferencias importantes se observa en los periodos de vibración, esto evidencia las dificultades que existen cuando se quiere representar con exactitud los aspectos dinámicos de una estructura frente a estas solicitaciones sísmicas.</p> <p><i>Palabras claves: Hormigón armado; Comportamiento sísmico; OpenSeesPy; Calibración bayesiana; Degradación estructural; Modelos constitutivos.</i></p>		
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO CON AUTOR/ES:</b>	<b>Teléfono:</b> +593-961107263 +593-939249890	<b>E-mail:</b> cristhianbalon200@gmail.com amymoreirao121@gmail.com	
<b>CONTACTO CON LA INSTITUCIÓN (COORDINADOR DEL PROCESO UTE)::</b>	<b>Nombre:</b> Glas Cevallos, Clara		
	<b>Teléfono:</b> +593-984616792		
	<b>E-mail:</b> clara.glas@cu.ucsg.edu.ec		
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			