

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE ELEMENTOS BRECHA
(GAP) EN UN MODELO CON GOLPETEO, CUANTIFICANDO
FUERZAS DE COLISIÓN EN PÓRTICOS ESPACIALES.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

MENCIÓN ESTRUCTURAS

MALES BONILLA JASSON IVÁN

jasonsarin@gmail.com

RIOFRÍO ORDÓÑEZ JAIME SEBASTIÁN

freelanceryoker@gmail.com

DIRECTOR: ING. M. Sc. EDGAR DAVID MORA MARTÍNEZ

edgar.mora@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2020

DECLARACIÓN

Nosotros, Males Bonilla Jasson Iván y Riofrío Ordóñez Jaime Sebastián, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

**MALES BONILLA
JASSON IVÁN**

**RIOFRÍO ORDÓÑEZ
JAIME SEBASTIÁN**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Males Bonilla Jasson Iván y Riofrío Ordóñez Jaime Sebastián, bajo mi supervisión.

ING. M. Sc. EDGAR DAVID MORA

DIRECTOR DEL PROYECTO

DEDICATORIA

A mis padres Jaime y Carmen, por cada uno de los esfuerzos que tomaron y me permitieron llegar a este punto sin ellos nada de esto fuera posible.

A mi familia por su apoyo incondicional en todo momento los quiero mucho.

Jaime Riosrio

AGRADECIMIENTO

A la vida por brindarme tan maravillosa familia, me siento muy afortunado, ya que son mi más grande orgullo.

A todas las personas que aportaron en mi vida estudiantil y artística, sepan que los llevo presente y solo puedo expresarles un siempre insuficiente gracias. Cada acción, enseñanza o incluso palabras de aliento las llevo en el corazón.

Jaime Rieffo

DEDICATORIA

A mis padres Iván y Yony, por su confianza, amor y paciencia. Además, por todo el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de estos años.

A mi hermano Enkery que con su cariño, confianza y bromas ha sabido motivarme a seguir adelante.

Jasson Males

AGRADECIMIENTO

Primeramente agradezco a mi madre Yony, a mi padre Iván y mi hermano Enkery, por toda la confianza y cariño que me han dado a lo largo de estos años y por siempre ser esa apoyo incondicional en todas las decisiones que he tomado. Por todos los esfuerzos que han hecho para permitirme culminar mis estudios universitarios y por las enseñanzas que me han brindado en estos años de vida junto a ellos. Y sobre todo por ser esa fuente inagotable de amor que siempre estará presente en mi vida y corazón. Este logro es por ustedes.

Quiero agradecer, a la vida que me ha permitido disfrutar de alegrías y penas, rodeado de personas maravillosas que me han brindado las mejores experiencias de la vida. A cada una de las personas que he conocido muchas gracias.

Al Ing. David Mora por la paciencia, comprensión y disposición en el desarrollo de este proyecto.

No querría concluir esta dedicatoria sin hacer participe a mis amigos que me han acompañado en todo el camino de mi vida universitaria Carlos V., Carlos R., Luis H., Luis M., Andres A., Pablo T., Xavier T., Cristian H., Marcelo E., Marcelo S., Ana, C., Erika A. y Wendy C. De igual manera quiero agradecer a Nathaly G. por la ayuda que me brindas con tus analogías, textos y párrafos que me motivan a seguir adelante. Gracias muchachos por su amistad y cariño.

Finalmente quiero agradecer a todas esas líneas de texto que me han ayudado a dar sentido a mi existencia y a ti querido lector que te has tomado el tiempo de leer este agradecimiento. Sin más que decir me dejo estas líneas de texto de Humberto Fierro que me han ayudado a sobrellevar mi existencia.

¿Qué escrutas, alma mía en esta eterna esfera; Si fuera de ti misma no tienes qué perder?; ¿Por qué tornas los ojos, insólita viajera; Si el llanto que tenías ya no

te ha de volver?

Jasson Males

ÍNDICE DE CONTENIDO

DECLARACIÓN	I
CERTIFICACIÓN	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABLAS	XVI
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3 ALCANCE.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 DEFINICIONES	6
2.2 TEORÍA CLÁSICA DE COLISIONES.....	6
2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA CONTACTO IMPACTO...9	9
2.3 GOLPETEO ENTRE ESTRUCTURAS.....	10
2.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA.....	14
2.4.1 MODELO DE MASA CONCENTRADA	14
2.4.2 MODELO DE MASA DISTRIBUIDA.....	15
2.5 MODELOS DE FUERZA DE COLISIÓN	17
2.5.1 MODELOS EQUIVALENTES DE GOLPETEO BASADOS EN FUERZA.....	17
2.5.2 ELEMENTOS "GAP"	18

2.5.3	MODELOS DE FUERZA DE GOLPETEO	19
2.5.4	COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN (e)	22
2.5.5	AMORTIGUAMIENTO DE IMPACTO (ξ)	25
2.5.6	RIGIDEZ DE IMPACTO (β)	26
2.6	FUERZA DE GOLPETEO	28
2.7	ZONAS DE INTERÉS EN DESPLAZAMIENTOS NODALES	29
3.	CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA MODELACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN OPENSEES	32
3.1	DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO	32
3.2	ELECCIÓN SOFTWARE	32
3.3	MODELOS CONSTITUTIVO DE MATERIALES	33
3.4	TRATAMIENTO DE ACELEROGRAMAS	35
3.5	DEFINICIÓN DE MODELO ANALÍTICO DE LA FUERZA DE CHOQUE.....	36
3.5.1	DESPLAZAMIENTO Y VELOCIDAD RELATIVA (δt y $\dot{\delta t}$)	37
3.5.2	MODELO VISCOELÁSTICO NO LINEAL	38
3.5.3	DIAGRAMA DE FLUJO	39
3.6.	ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL.....	41
3.6.1	ANÁLISIS DINÁMICA SIN FUERZA DE CHOQUE.....	42
3.6.2	RESPUESTA DINÁMICA CON FUERZA DE CHOQUE.	42
3.6.2.1	Dynamic_WITH_Pounding (PARAMETROS DE ENTRADA).....	43
3.6.2.2	Fpounding y periodos de discretización	44
3.6.2.3	Dynamic_WITH_Pounding_NIVe (PARAMETROS DE SALIDA). ...	44
3.7	SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD (SDOF).....	45
3.7.1	CASO 1: JANKOWSKY 2010 SDOF.....	46
3.7.1.1	Definición geométrica de las estructuras	47
3.7.1.2	Propiedades mecánicas de materiales	48
3.7.1.3	Propiedades dinámicas	49
3.7.1.4	Análisis dinámico sin fuerzas de colisión caso 1.....	49
3.7.1.5	Propiedades de colisión.....	50
3.7.1.6	Desplazamiento y velocidad relativa caso 1	50
3.8	SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD (MDOF).....	52
3.8.1.	CASO 2. IGUAL NÚMERO DE PISOS	54

3.8.1.1	Definición geométrica de las estructuras	55
3.8.1.2	Propiedades mecánicas de materiales	56
3.8.1.3	Definición de secciones	56
3.8.1.4	Propiedades dinámicas	58
3.9.1.5	Análisis dinámica sin fuerza de colisión caso 2	58
3.8.1.6	Propiedades de colisión.....	59
3.8.1.7	Velocidades y desplazamientos relativos	59
3.8.2	CASO 3. DIFERENTE NÚMERO DE PISOS	61
3.8.2.1	Definición geométrica de las estructuras	62
3.8.2.2	Propiedades mecánicas de materiales	62
3.8.2.3	Definición de secciones	63
3.8.2.4	Propiedades dinámicas	64
3.8.2.5	Respuesta dinámica sin fuerza de choque caso 3	64
3.8.2.6	Propiedades de colisión.....	65
3.8.2.7	Velocidades y desplazamientos relativos caso 3	66
4.	CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA MODELACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN ETABS.....	68
4.1	DESCRIPCIÓN DEL CASOS DE ESTUDIO	68
4.1.1	DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LA ESTRUCTURA.....	68
4.1.2.	CONSIDERACIONES DE MODELADO.....	69
4.2.	CALIBRACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL	70
4.2.1.	PERIODO	70
4.2.2.	ELEMENTO GAP	71
4.2.2.1	Abertura.....	72
4.2.2.2	Rigidez	73
4.2.2.3	Grados de libertad	74
4.2.3	FUERZAS.....	75
4.3	CANTILIVER.....	75
4.3.1	RIGIDEZ.....	78
4.3.2	GRADOS DE LIBERTAD.....	78
4.4	CALIBRACIÓN OPENSEES Y ETABS DE MODELOS EN EL RANGO LINEAL.....	79

5. CAPÍTULO 5: RESULTADOS.....	80
5.1. RESULTADOS OPENSEES	80
5.1.1 RESPUESTA DINÁMICA CON FUERZAS DE COLISIÓN.....	80
5.1.1.1 Caso 1	80
5.1.1.2 Caso 2.....	84
5.1.1.3 Caso 3.....	88
5.1.2 FUERZAS DE colisión CON DIFERENTES PERÍODOS DE DISCRETIZACIÓN	93
5.1.2.1 Caso 1	93
5.1.2.2 Caso 2.....	95
5.1.2.3 Caso 3.....	97
5.1.3. BUCLES DE HISTÉRESIS (ENERGÍA DISIPADA).....	99
5.1.3.1 Caso 1	99
5.1.3.2 Caso 2.....	100
5.1.3.3 Caso 3.....	101
5.2. RESULTADOS DE ETABS	103
5.2.1 RESPUESTA DINÁMICA CON Y SIN FUERZAS DE CHOQUE.....	103
5.2.1.1 Cantiliver	103
5.2.1.2 Pórtico Espacial (Caso 1)	103
5.2.2 FUERZAS DE colisión CON DIFERENTES PERÍODOS DE DISCRETIZACIÓN	104
5.2.2.1 Cantiliver	104
5.2.2.2 Pórtico Espacial (Caso 1)	106
5.2.3 BUCLES DE HISTÉRESIS (ENERGÍA DISIPADA).....	107
5.2.3.1 Cantiliver	107
5.2.3.2 Pórtico Espacial (Caso A).....	108
5.3. EVALUACIÓN ELEMENTO “GAP” DE ETABS	109
5.3.1 EVALUACIÓN EN CANTILIVER VARIANDO LA RIGIDEZ DE COLISIÓN	110
5.3.1.1. Evaluación con rigidez de colisión calculada con Ec.1.....	110
5.3.1.2. Evaluación con rigidez de colisión calculada con Ec.2., y rigidez propuesta por (Jankowski,2010).....	111

5.3.2 EVALUACIÓN EN PÓRTICO ESPACIAL VARIANDO RIGIDEZ DE COLISIÓN, UBICACIÓN Y CANTIDAD DE GAPS.....	113
5.3.2.1 Caso A: 1 Gap Intermedio	113
5.3.2.1.1 Ecuación 4.1	113
5.3.2.1.2 Ecuación 4.2	115
5.3.2.2 Caso B (1 Gap esquinero) y Caso C (2 Gap esquineros)	117
5.3.2.2.1 Ecuación 4.1 y 4.2.....	117
5.3.3. FUERZAS DE COLISION VARIANDO LA RIGIDEZ DE COLISIÓN. .	119
5.3.3.1 Cantiliver	119
5.3.3.1.1 Ecuación 4.1	119
5.3.3.1.2 Ecuación 4.2	120
5.3.3.2 Pórtico espacial Caso A.....	121
5.3.3.2.1 Ecuación 4.1	121
5.3.3.2.2 Ecuación 4.2	122
5.4 COMPARACIONES OPENSEES Y ETABS DE MODELOS EN EL RANGO LINEAL.	122
5.4.1. Usando $K_1=2.77E3$	123
5.4.2. Verificando $K > 2.77E3$ y PATRONES DE INCONSISTENCIAS.....	124
5.4.2.1 Inconsistencias en la zona del primer impacto.....	124
5.4.2.2 Inconsistencias de desplazamientos en el primer punto de inflexión después del primer impacto	126
5.4.2.3 Problemas de convergencia debido a valores de fuerza de colisión muy grandes	127
6. CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	129
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	135
ANEXOS.....	140
ANEXO No1	141
ANEXO No2	150

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Daños producidos por colisiones	1
Figura 2.1: Proceso de colisión	7
Figura 2.2: Deformación asumida en la estereo mecánica	8
Figura 2.3: Clasificación del golpeteo	10
Figura 2.4: Golpeteo losa contra losa	11
Figura 2.5: Golpeteo losa contra columna	11
Figura 2.6: Golpeteo entre estructuras de diferente altura	12
Figura 2.7: Golpeteo entre estructuras de diferente masa	13
Figura 2.8: Golpeteo entre estructuras con centro de masa no coaxiales	13
Figura 2.9: Golpeteo entre estructuras con similar vibración	14
Figura 2.10: Modelo para el análisis del golpeteo: masa concentrada	15
Figura 2.11: Modelo para el análisis del golpeteo: masa distribuida	16
Figura 2.12: Fuerza de golpeteo y duración del contacto T_s de la onda de la teoría de impacto	16
Figura 2.13: Modelos equivalentes de golpeteo basados en fuerza	17
Figura 2.14: Modelo de análisis estructural del golpeteo	18
Figura 2.15: Modelo resorte lineal	19
Figura 2.16: Modelo resorte no lineal	20
Figura 2.17: Modelo Kelvin	21
Figura 2.18: Modelo no lineal visco elástico	22
Figura 2.19: Coeficiente de restitución e	22
Figura 2.20: Ensayo experimental para obtener e	23
Figura 2.21: Coeficiente de restitución en función de la velocidad de pre-impacto	24
Figura 2.22: Comparación diferentes modelos de colisión diferente ξ y el mismo e	25
Figura 2.23: Grafica tiempo historia de la fuerza de golpeteo	28
Figura 2.24: Grafico fuerza vs deformación	29
Figura 2.25: Desplazamientos nodales sin golpeteo y con golpeteo	30
Figura 2.26: Zonas de interés	31
Figura 2.27: Acercamiento a la zona del primer impacto	31
Figura 3.1: Curva esfuerzo deformación material 'STEEL01'	34
Figura 3.2: Curva esfuerzo deformación material	35
Figura 3.3: El Centro acelerograma original vs modificado	36
Figura 3.4: Northridge acelerograma original vs modificado	36
Figura 3.5: Diagrama de flujo para cálculo de Fuerzas de Colisión y bucles de histéresis. Programa: Dynamic_WITH_Pounding_NIVe	41
Figura 3.6: Modelo de masas concentradas con un grado de libertad dinámico (SDOF), con modelo de fuerza de colisión Viscoelástico no lineal. Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)	45

Figura 3.7: Caso 1: Jankowski 2010 SDOF.....	47
Figura 3.8: Respuesta dinámica sin fuerza de colisión.....	50
Figura 3.9: Desplazamiento relativo PISO 1 Caso1	51
Figura 3.10: Velocidad relativo PISO 1 Caso 1	52
Figura 3.11: Modelo de masas concentradas con varios grados de libertad dinámicos (MDOF), con modelo de fuerza de colisión Viscoelástico no lineal.....	53
Figura 3.12: Modelo experimental y matemático del caso 2	55
Figura 3.13: Mallado de la sección transversal de vigas y columnas.....	57
Figura 3.14: Respuesta dinámica sin fuerza de colisión Caso 2.....	59
Figura 3.15: Desplazamiento relativo	61
Figura 3.16: Modelo experimental y matemático del caso 3	62
Figura 3.17: Mallado de la sección transversal de columnas y vigas.....	63
Figura 3.18: Respuesta dinámica sin fuerza de choque piso 3.....	65
Figura 3.19: Desplazamiento relativo	67
Figura 4.1: Estructuras ensayas por (Jankowski,2010).	68
Figura 4.2: Masa adicional asignada a la estructura 1 y 2.....	69
Figura 4.3: Modelo computacional de la estructura original.....	70
Figura 4.4: Representación gráfica del elemento gap en ETABS.....	72
Figura 4.5: Asignación de la apertura d0.....	72
Figura 4.6: Restricciones de los grados de libertad	75
Figura 4.7: Sistema equivalente de un grado de libertad cantiliver.....	76
Figura 4.8: Sistema equivalente	78
Figura 4.9: Restricción de los grados de libertad.....	78
Figura 4.10: Calibración de modelos OpenSees y ETABS.....	79
Figura 4.11: Acercamiento a las zonas de interés.....	79
Figura 5.1: Desplazamientos nodales con y sin fuerza de colisión CASO 1	81
Figura 5.2: a) Acercamiento a las zonas de interés; b) Acercamiento a la primera colisión; c) Aceleraciones nodales con y sin golpeteo (EST. IZQUIERDA); d) Aceleraciones nodales con y sin golpeteo (EST. DERECHA)	82
Figura 5.3: a) Fuerzas de colisión de todo el evento sísmico; b) Primera fuerza de colisión; c) Bucles de histéresis	83
Figura 5.4: Desplazamientos nodales con y sin fuerza de colisión CASO 2 a) PISO 1; b) PISO 2; c) Acercamiento al primer impacto piso 1; d) Acercamiento al primer impacto piso 2.....	85
Figura 5.5: Aceleraciones nodales con y sin golpeteo	86
Figura 5.6: Fuerzas de colisión de todo el evento sísmico y bucles de histéresis.	87
Figura 5.7: Desplazamientos nodales con y sin fuerza de colisión CASO 3 a) PISO 1; b) PISO 2; c) PISO 3; d) Acercamiento a las zonas de interés; e) Acercamiento al primer impacto	89
Figura 5.8: Aceleraciones nodales.	90
Figura 5.9: Aceleraciones nodales y fuerzas de colisión.	91

Figura 5.10: Fuerzas de colisión de todo el evento sísmico y bucles de histéresis.	92
Figura 5.11: Fuerzas de colisión con diferentes periodos de discretización caso 1 <i>a)</i> Todo el evento sísmico & <i>b)</i> Ampliación a la primera fuerza de colisión	94
Figura 5.12: Fuerzas de colisión con diferentes periodos de discretización caso 2 Todo el evento sísmico <i>a)</i> PISO 1; <i>c)</i> PISO 2 & Ampliación a la primera fuerza de colisión <i>b)</i> PISO 1; <i>d)</i> PISO 2	96
Figura 5.13: Fuerzas de colisión con diferentes periodos de discretización caso 3 Todo el evento sísmico <i>a)</i> PISO 1; <i>b)</i> PISO 2 <i>c)</i> PISO 3	98
Figura 5.14: Bucle de histéresis con diferentes periodos de discretización caso 1 <i>a)</i> Todo el evento sísmico & <i>b)</i> Ampliación a los bucles con mayor periodo de discretización	100
Figura 5.15: Ampliación a los bucles de histéresis con mayores periodos de discretización caso 2 <i>a)</i> PISO 1 & <i>b)</i> PISO 2	101
Figura 5.16: Ampliación a los bucles de histéresis con mayores periodos de discretización caso 3 <i>a)</i> PISO 1 & <i>b)</i> PISO 2	102
Figura 5.17: Desplazamientos nodales CANTILIVER	103
Figura 5.18: Desplazamientos nodales PÓRTICO ESPACIAL Caso A	104
Figura 5.19: Fuerzas de colisión CANTILIVER	105
Figura 5.20: Fuerzas de colisión PÓRTICO ESPACIAL Caso A	106
Figura 5.21: Bucle de histéresis CANTILIVER	108
Figura 5.22: Bucle de histéresis PÓRTICO ESPACIAL Caso A	109
Figura 5.23: Sistema equivalente (Cantiliver) ETABS	110
Figura 5.24: Superposición de desplazamientos nodales ec. 1.	110
Figura 5.25: Zona de interés	111
Figura 5.26: Superposición de desplazamientos nodales ec. 2.	112
Figura 5.27: Zona de interés	112
Figura 5.28: Pórtico espacial (ETABS)	113
Figura 5.29: Superposición de desplazamientos nodales ec. 1.	114
Figura 5.30: Zona de interés.	114
Figura 5.31: Superposición de desplazamientos nodales ec. 2.	115
Figura 5.32: Superposición de desplazamientos nodales ec. 2.	116
Figura 5.33: Zona de interés.	116
Figura 5.34: Pórtico espacial (ETABS)	117
Figura 5.35: Pórtico espacial (ETABS)	118
Figura 5.36: Pórtico espacial (ETABS)	119
Figura 5.37: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 1.	120
Figura 5.38: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 2.	120
Figura 5.39: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 2.	121
Figura 5.40: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 1.	121
Figura 5.41: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 2.	122
Figura 5.42: Comparación de fuerzas de colisión con $k_1=2.77e3$	123

Figura 5.43: Inconsistencias en la zona del primer impacto	125
Figura 5.44: Inconsistencias en la zona de primer punto de inflexión después del primer impacto de la estructura izquierda.....	127
Figura 5.45: Problemas de convergencia debido a valores de fuerza de colisión muy grandes.	128

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1: Eventos sísmicos representativos	2
Tabla 3.1: Desventajas de los modelos de fuerza de colisión	32
Tabla 3.2: Desventajas de los modelos de fuerza de colisión	37
Tabla 3.3: Propiedades geométricas Caso 1	48
Tabla 3.4: Propiedades mecánicas de los materiales Caso 1	48
Tabla 3.5: Propiedades de las secciones de las estructuras Caso 1	48
Tabla 3.6: Propiedades dinámicas de las torres caso 1	49
Tabla 3.7: Propiedades de colisión caso 1	50
Tabla 3.8: Propiedades geométricas de cada estructura Caso 2	56
Tabla 3.9: Propiedades mecánicas de los materiales caso 2.....	56
Tabla 3.10: Propiedades de las secciones de las estructuras caso 2.	57
Tabla 3.11: Propiedades dinámicas de las torres caso 2.	58
Tabla 3.12: Propiedades de colisión Caso 1	59
Tabla 3.13: Propiedades mecánicas de los materiales caso 3.....	62
Tabla 3.14: Propiedades de las secciones de las estructuras caso 3.	63
Tabla 3.15: Propiedades dinámicas de las torres caso 3.	64
Tabla 3.16: Propiedades de colisión Caso 3.....	65
Tabla 4.1: <i>Masa de las estructuras</i>	70
Tabla 4.2: <i>Calibración del modelo computacional</i>	71
Tabla 4.3: <i>Rigidez axial del elemento gap ecuación (4.1)</i>	74
Tabla 4.4: <i>Rigidez axial del elemento gap ecuación (4.2)</i>	74
Tabla 4.5: <i>Dimensiones de la estructura equivalente para la estructura 1 y 2</i>	77
Tabla 5.1: Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 1	94
Tabla 5.2: Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 2 (piso 1).....	97
Tabla 5.3: Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 2 (piso 2).....	97
Tabla 5.4: Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 3 (piso 1).....	99
Tabla 5.5: Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 3 (piso 2).....	99
Tabla 5.6: Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 3 (piso 3).....	99
Tabla 5.7: Fuerza de colisión variando los periodos de discretización CANTILIVER.....	105
Tabla 5.8: Fuerza de colisión variando los periodos de discretización PÓRTICO ESPACIAL Caso A.....	107
Tabla 6.1: Mejores resultados en ETABS	133
Tabla 6.2: Mejores resultados en OpenSees	133

RESUMEN

El presente trabajo contempla el estudio de tres ensayos experimentales enfocados en golpeteo estructural documentado en referencias bibliográficas. Dos de ellos fueron experimentos a escala reducida y la restante a escala real.

Todas las estructuras fueron analizadas utilizando el modelo viscoelástico no lineal de fuerzas de colisión (NIVe), para lo cual se desarrolló una función (*Dynamic_WITH_pounding_NIVe*) que tome en cuenta las fuerzas de colisión dentro de un análisis transitorio en OpenSees.

Además, se evalúa la confiabilidad del elemento tipo link Gap disponible en programas comerciales como Etabs. A este elemento se compara con la función (*Dynamic_WITH_pounding_LE*) que considera el modelo Elástico Lineal y el modelo ya mencionado.

Se identifica a la rigidez de impacto como la variable que más influencia al obtener fuerzas de colisión similares, por lo tanto, en la comparación se considera diferentes valores de rigidez calculadas a partir de ecuaciones recomendadas. Al analizar zonas de interés es posible identificar e interpretar patrones de inconsistencias.

Palabras clave: Golpeteo estructural, Fuerzas de colisión, Rigidez de impacto, Coeficiente de restitución, Amortiguamiento de impacto.

ABSTRACT

The present work contemplates the study of three experimental trials focused on structural pounding documented in bibliographic references. Two of them were small-scale experiments and the remaining one was full-scale.

All structures were analyzed using the non-linear viscoelastic model of collision forces (NIVe), for which a function (*Dynamic_WITH_pounding_NIVe*) was developed to take into account the collision forces within a transient analysis in OpenSees.

In addition, the reliability of the link Gap element available in commercial programs such as ETABS is evaluated. This element is compared with the function (*Dynamic_WITH_pounding_LE*) that considers the Linear Elastic model and the model already mentioned.

Impact stiffness is identified as the most influential variable in obtaining similar collision forces, therefore, different stiffness values calculated from recommended equations are considered in the comparison. By analyzing areas of interest it is possible to identify and interpret patterns of inconsistencies.

Keywords: Structural pounding, Collision force, Impact stiffness, Restitution coefficient, impact damping.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

El golpeteo entre estructuras contiguas se refiere al impacto que ocurre durante un sismo cuando la separación es inadecuada o nula. Este efecto se produce cuando las características dinámicas de las estructuras son diferentes, ocasionando que vibren fuera de fase y se genere golpeteo, produciendo desde daños arquitectónicos hasta daños graves en elementos estructurales que pueden contribuir al colapso estructural como se puede ver en la figura (1.1). (Papadrakakis, Mouzakis, Plevris, & Bitzarakis, 1991)



Figura 1.1: Daños producidos por colisiones

Fuente: (Rajaram & Kumar, 2014)

Evaluaciones realizadas en zonas urbanas llevadas a cabo después de eventos sísmicos representativo, como se observa en la tabla 1. (Khatiwada & Chow, 2014a). Identifican al golpeteo como una vulnerabilidad importante capaz de alterar la dinámica esperada en las estructuras.

Tabla 0.1:
Eventos sísmicos representativos

Sismos	Magnitud	Profundidad	Epicentro	Año	Estructuras Estudiadas
San Fernando	6.5-6.7 Mw	13 km	34.41°N 118.40°W	1971	Olive View Hospital
Mexico	8.0-8.1 Mw	15 km	18.35°N 102.39°W	1985	-
Loma Prieta	6.9 Mw	19 km	37.04°N 121.88°W	1989	-
Northridge	6.7 Mw	18.2 km	34.213°N 118.537°W	1994	-
Kobe	6.9 Mw	17.6 km	34.59°N 135.07°E	1995	-

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

El último evento sísmico representativo en Ecuador fue registrado en 2016 con una magnitud de 7.8 Mw a una profundidad de 20 km y epicentro en la ciudad de Pedernales, en esta ciudad se pudo observar la gran intensidad del evento, evidenciando configuraciones estructurales que permiten la aparición de varias vulnerabilidades entre ellas el golpeteo (Singaicho2016).

Es preocupante observar que muchas otras estructuras a lo largo del territorio ecuatoriano muestran similares configuraciones estructurales que pueden generar golpeteo, por esta razón es importante conocer e investigar este mecanismo de daño, además verificar si los elementos utilizados en la representación computacional satisfacen las condiciones para su estudio (Tenelema2017).

Este estudio se centra en analizar el fenómeno del golpeteo para el caso losa contra losa. En estructuras de acero que han sido ensayadas en laboratorio. Usando representaciones computacionales que idealizan el impacto por medio de elementos brecha (GAP), los cuales permiten cuantificar las fuerzas de golpeteo generadas en las estructuras durante las colisiones.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la confiabilidad de elementos brecha para disminuir la incertidumbre en el modelado de la patología del golpeteo mediante la cuantificación e

implementación de las fuerzas de choque generadas durante el impacto, en el programa OpenSees, para promover mejores diseños, evaluaciones y reforzamientos estructurales.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Obtener las fuerzas de colisión de los ensayos experimentales de diversos artículos científicos donde se han ensayado diferentes pórticos de acero en mesas vibratorias.
2. Proponer un pseudocódigo que tome en cuenta las fuerzas de choque de estructuras adyacentes, de tal manera que abarque condiciones representativas para la evaluación de estructuras porticadas.
3. Comparar los resultados obtenidos en la experimentación de diversos artículos científicos y el pseudocódigo generado.
4. Realizar un análisis de sensibilidad para identificar cuáles son las variables que más afectan en la representación computacional.

1.3 ALCANCE

La presente investigación busca modelar estructuras aporticadas de acero que fueron ensayadas en diferentes laboratorios de investigación, se asume la masa de la estructura concentrada al nivel de la losa, además, las losas son consideradas rígidas (Abdel-Mooty, Al-Atrpy, & Ghouneim, 2009).

A su vez las estructuras están en la posibilidad de incursionar en el rango no lineal, esto puede ser observado en el comportamiento histerético de elementos estructurales, pérdida de rigidez y cambios en las energías producidas en el sistema, mediante el diagrama momento-rotación.

Además, se toma en cuenta algunas simplificaciones y se asume que:

La estructura se encuentra empotrada en la base por tanto no se considera interacción suelo estructura.

El amortiguamiento se considera constante a lo largo del tiempo (Rowinski,2011)

No se consideran efectos de esfuerzo por torsión accidental.

No se considera el efecto P-Delta (momento de segundo orden).

No se estudia el caso de impacto losa contra columna.

Para la simulación del golpeteo se usarán modelos de fuerza equivalente, estos modelos usan elementos de impacto que poseen diversos planteamientos matemáticos. El presente estudio propone el uso del modelo viscoelástico no lineal ya que no muestra incongruencias matemáticas y puede llegar a ser fiable en condiciones especiales.

El modelo computacional se lo realizará en el programa OpenSees, además, se aplicará un análisis dinámico tiempo historia no lineal. Se usarán tres diferentes ensayos experimentales, en cada ensayo se utilizarán acelerogramas que han sido pre procesados en Matlab. Las consideraciones que estarán constantes a lo largo del estudio se mencionan a continuación, mientras que las que varíen se las irá señalando según la ocupación.

1. El modelo no lineal del material ocupado es Steel 02.(Mazzoni, McKenna, Scott, & Fenves, 2006)
2. La losa se comporta como diafragma rígido.

1.4 JUSTIFICACIÓN

El golpeteo como fuente de vulnerabilidad en las estructuras ha sido estudiado en las últimas décadas por varios autores alrededor del mundo, la idealización del elemento GAP constantemente está siendo utilizado y modificado para intentar entender el fenómeno.

Por tanto, un primer acercamiento al investigar la utilización de elementos GAP para modelar la patología de golpeteo, mediante la teoría clásica de colisiones con la implementación de una propuesta de pseudocódigo en OpenSees significará una

disminución en la incertidumbre, implicando así conocimiento más fiable acerca del modelado de golpeteo, y posibles nuevos conocimientos que sean útiles para posteriores estudios en esta línea de investigación.

La metodología provista en esta investigación se basa en la teoría clásica de colisiones para sustentar el algoritmo computacional, ya que la mayoría de modelos matemáticos toman como hipótesis los conceptos básicos de la teoría de colisiones.

Para la calibración del algoritmo computacional se utilizarán referencias válidas evaluando un elemento brecha desde una visión experimental. Los resultados mostrados en los ensayos experimentales de las fuentes bibliográficas seleccionadas serán las que permitan comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo computacional propuesto en este proyecto. Permitiendo evaluar la fiabilidad de modelos.

El software que se usará es OpenSees, una plataforma de código abierto y gratuito especialmente creado para simular el comportamiento de sistemas estructurales con condiciones especiales pensado para la investigación. Además, permite el desarrollo de nuevos códigos que pueden interactuar con las bibliotecas ya existentes.

El presente trabajo busca aportar a la formación profesional al abordar más exhaustivamente una patología que no es tema de estudio en clases de pregrado de Ingeniería Civil. Con lo cual el pseudocódigo, modelaciones y ejemplos pretenden servir de base teórica y técnica en proyectos de vinculación de estructuras aporricadas que presenten la patología de golpeteo, promoviendo mejores diseños, evaluaciones y reforzamientos asegurando así estructuras más seguras.

2. CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 DEFINICIONES

Se define como impacto al proceso generado en la colisión de dos o más objetos. Así pues, el impacto engloba una extensa gama de procesos que se enuncian a continuación: juego de billar, choque de automóviles, el impacto de las olas o el golpe del aire en estructuras, e incluso colisiones moleculares. (Goldsmith & Frasier, 1961)

El concepto de impacto se diferencia de otro tipo de cargas como estáticas o instantáneas por la naturaleza de su aplicación. Las fuerzas generadas por la colisión son aplicadas y retiradas en un intervalo de tiempo muy corto e inicia la propagación de las ondas de tensión que se alejan de la región de contacto. La carga estática se considera como una serie de estados de equilibrio y no necesita considerar efectos por aceleración o propagación. (Goldsmith & Frasier, 1961)

Mientras la carga rápida generalmente no se produce por efecto de colisiones, además, el tiempo asociado a este tipo de carga es más largo que el tiempo en los procesos de impacto. Las tensiones generadas por estas cargas, pueden no tomarse en cuenta debido a su naturaleza transitoria. (Goldsmith & Frasier, 1961)

2.2 TEORÍA CLÁSICA DE COLISIONES

Teoría clásica de colisiones, llamada estereo mecánica, se enfoca en determinar las velocidades de los elementos que participan en la colisión sin tomar en cuenta la respuesta estructural (Jankowski & Mahmoud, 2015). Esta teoría principalmente se basa en la ley impulso-momento para cuerpos rígidos, sin embargo, no es capaz de describir tensiones, fuerzas o deformaciones instantáneas producidas y está limitada al tipo de impulso aplicado si este es lineal o angular (Goldsmith & Frasier, 1961).

Esta teoría no puede cuantificar las deformaciones en el punto de contacto, de manera que supone que una fracción de la energía cinética inicial del sistema se transforma en vibraciones. Esta hipótesis es aplicable para el impacto entre 2 esferas o en el caso que la esfera se impacte contra una masa rígida larga, pero no en el caso de barras, vigas o elementos esbeltos (Goldsmith & Frasier, 1961).

Para impactos perfectamente elásticos de dos cuerpos, las velocidades finales de los objetos se determinan a partir de la ley de conservación de energía, la misma que proporciona la segunda relación. Si se produce una deformación permanente a partir del impacto, esta relación es reemplazada por un coeficiente de restitución e (Goldsmith & Frasier, 1961).

El coeficiente de restitución permite describir el grado de plasticidad de la colisión, explica la disipación de energía durante el impacto por efectos como, por ejemplo, deformaciones plásticas, agrietamiento local y fricción (Jankowski & Mahmoud, 2015).

La disipación de energía durante el proceso de colisión depende de las velocidades con las que los cuerpos colindantes se acercan y alejan. En la figura (2.1) se muestra el proceso clásico de colisión de cuerpos colindantes. (Xue, Zhang, He, Zou, & Zhang, 2016)

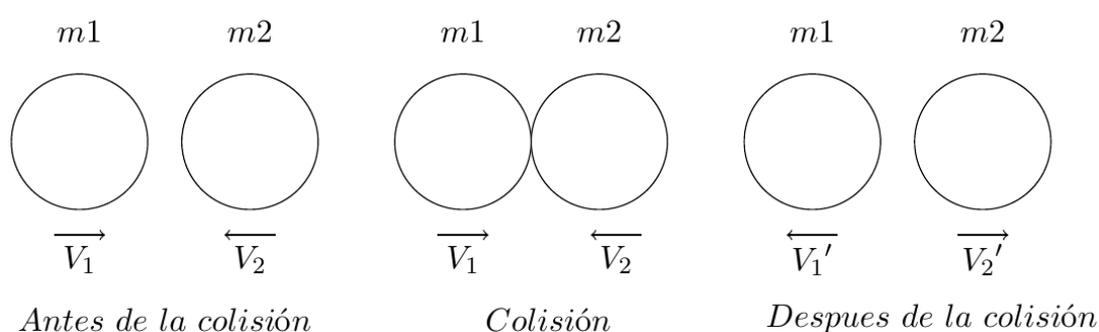


Figura 2.1: Proceso de colisión
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

La velocidad final después del impacto de los cuerpos colindantes se expresa como se muestra en la ecuación (2.1) y (2.2):

$$V_1' = V_1 - (1 - e) \frac{m_1 V_1 - m_2 V_2}{m_1 + m_2} \quad (2.1)$$

$$V_2' = V_2 - (1 - e) \frac{m_1 V_1 - m_2 V_2}{m_1 + m_2} \quad (2.2)$$

Donde m_1 y m_2 son las masas de los cuerpos colindantes, V_1 y V_2 son las velocidades antes de la colisión, y V_1' y V_2' son las velocidades después del impacto. Y e es el coeficiente de restitución, el cual se obtiene como se muestra en la ecuación (2.3):

$$e = \frac{V_2' - V_1'}{V_2 + V_1} \quad (2.3)$$

A pesar que la teoría ignora el proceso de interacción entre los cuerpos que chocan, no se ignora la existencia de deformaciones en períodos finitos de contacto. Como se muestra en la figura (2.2), el historial de deformación consta de 2 sub intervalos. El período de aproximación que abarca desde el punto de contacto hasta el punto de máxima deformación, el cual viene seguido de un período de restitución que dura hasta el momento de separación. (Goldsmith & Frasier, 1961)

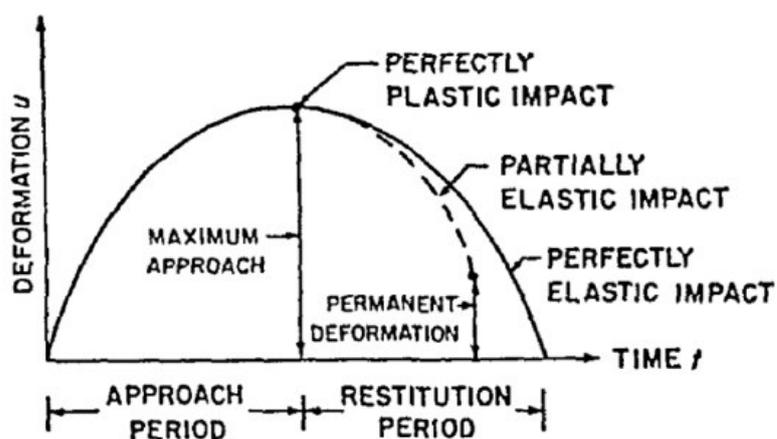


Figura 2.2: Deformación asumida en la estereo mecánica
Fuente: (Goldsmith & Frasier, 1961)

La energía de disipación en el proceso de golpeteo debido a vibraciones de alta frecuencia, calor y ruido. Se cuantifica como se muestra en la ecuación (2.4):

$$\Delta E = \frac{1}{2} (1 + e) \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} (V_1 - V_2)(V_1 - V_2 + V_2' - V_1') \quad (2.4)$$

2.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROBLEMA CONTACTO IMPACTO

Se considera 2 cuerpos continuos con volúmenes V_1 y V_2 y superficies S_1 y S_2 , las cuales entran en contacto una con otra en un instante de tiempo t . El problema de contacto se define como un problema de límite inicial donde cada cuerpo tiene sus condiciones de equilibrio de contacto y ecuaciones constitutivas del material. (Wang, Wang, Cheng, & Yao, 2007)

De acuerdo a los principios de la mecánica continua, las condiciones de contacto pueden ser descritas de la siguiente manera:

1. Condición Geométrica: Al tiempo t , la superficie de los dos cuerpos en contacto debe cumplir la condición de impenetrabilidad.

$$V_1 \cap V_2 = 0 \quad y \quad S_1 \cap S_2 \neq 0 \quad (2.5)$$

Para el punto en la superficie de contacto el vector posición x_1 y x_2 deben ser los mismos, y los vectores unitarios normales de la superficie exterior n_1 y n_2 en las respectivas superficies deben estar en la dirección opuesta.

$$x_1 = x_2 \quad y \quad n_1 = -n_2 \quad (2.6)$$

2. Condición Cinemática: esta condición restringe las velocidades v_1 y v_2 en los puntos de la superficie común en contacto de los cuerpos para satisfacer la impenetrabilidad:

$$v_1 \cdot n_2 + v_2 \cdot n_2 = 0 \quad (2.7)$$

3. Condición Cinética: la condición para el balance del momento en el límite es necesario que cumpla con:

$$f^1 + f^2 = 0 \quad (2.8)$$

Donde f es la acción de tracción de Cauchy que actúa en la superficie de contacto. En ese mismo instante de tiempo, la fuerza normal en la superficie de contacto debe cumplir con:

$$f_1 \cdot n_1 \leq 0 \quad \text{y} \quad f_2 \cdot n_2 \leq 0 \quad (2.9)$$

2.3 GOLPETEO ENTRE ESTRUCTURAS

El golpeteo entre estructuras describe la colisión entre estructuras adyacentes como resultado de algún tipo de excitación, comúnmente de origen sísmico. Caracterizar el golpeteo requiere un conocimiento detallado del comportamiento dinámico de las estructuras, de la misma manera saber cómo reaccionan las estructuras a impulsos de alta magnitud, pero de corta duración. Generalmente el golpeteo entre estructuras adyacentes se puede categorizar en 2 casos, en el primero el golpeteo ocurre losa contra losa y en el segundo el golpeteo ocurre losa contra columna como se observa en la figura (2.3). (Cole, Dhakal, Carr, & Bull, 2010)

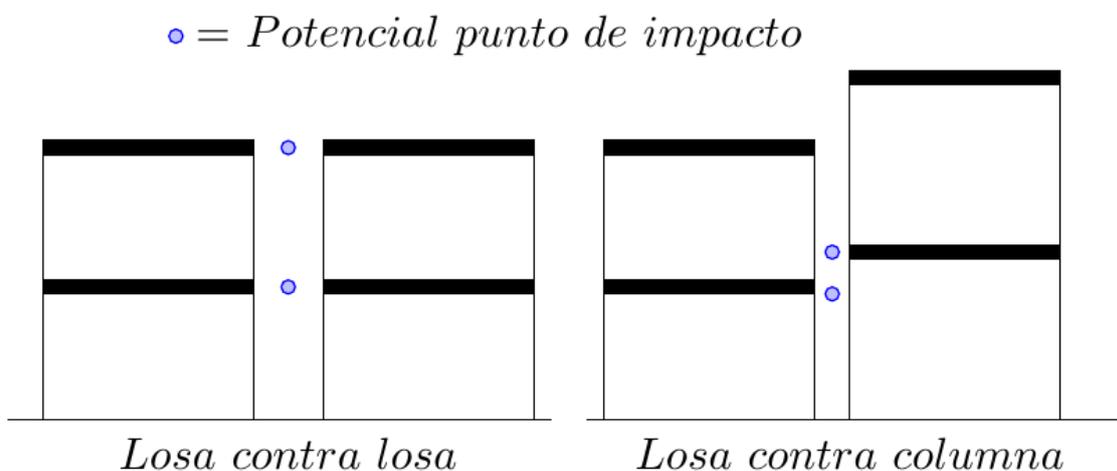


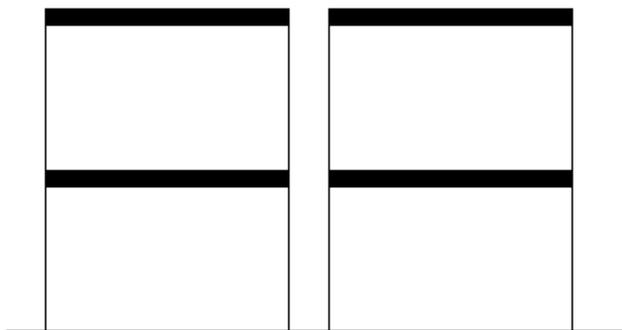
Figura 2.3: Clasificación del golpeteo

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

A continuación, se presentan los casos en que las estructuras pueden sufrir daño por el golpeteo:

1. Estructuras adyacentes con la misma altura e igual nivel de piso.

Este caso de golpeteo es conocido como golpeteo losa contra losa, edificaciones con estas características poseen un comportamiento dinámico similar. Si el golpeteo ocurre, usualmente el daño se limita a componentes no estructurales. (Namboothiri, 2017)



Losa contra losa

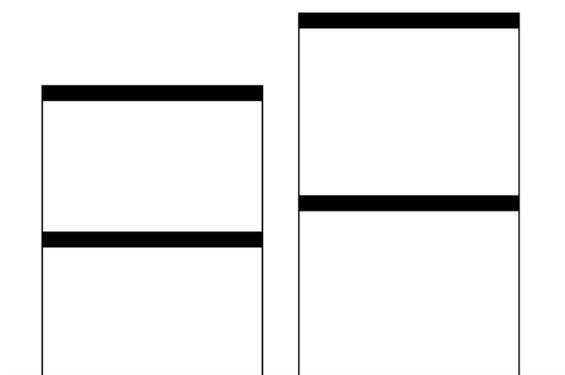
Figura 2.4: Golpeteo losa contra losa

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

2. Estructuras adyacentes con diferentes niveles de piso.

Este caso es conocido como golpeteo losa contra columna. Generalmente se presenta cuando la altura de piso de las estructuras no es igual. Debido a que las estructuras vibran en diferentes fases, el golpeteo ocurre. La losa de la estructura impacta la columna de la estructura adyacente, generando graves daños. (Namboothiri, 2017)

Las columnas afectadas por el golpeteo están sometidas a fuerzas de corte muy altas, por lo que la ductilidad de las mismas se ve excedida provocando fallas por corte. Este caso es el más peligroso ya que puede ocasionar el colapso de la estructura. (Cole et al., 2010)



Losa contra columna

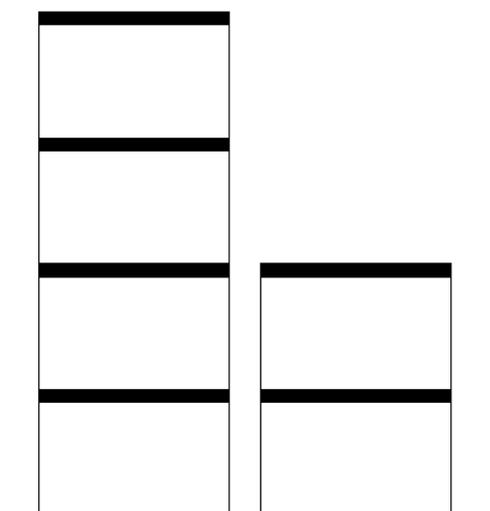
Figura 2.5: Golpeteo losa contra columna

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3. Estructuras adyacentes de diferente altura e igual nivel de piso.

Cuando dos estructuras con diferentes alturas están juntas, por las diferentes propiedades dinámicas, la estructura de menor altura golpeará a

la estructura adyacente. Lo que genera un efecto de cizalla en los niveles superiores de la estructura de mayor altura. Es importante tener en cuenta que cuanto mayor sea el impacto de la estructura de menor altura, la respuesta de la estructura de mayor altura será más intensa. Si la diferencia de alturas es considerable la estructura de menor altura puede actuar como contrafuerte con la estructura vecina generando efectos adversos para las 2 estructuras. Primero la estructura de menor altura recibe una carga inesperada, mientras que la estructura de mayor altura debido a la discontinuidad que se genera ve alterado su comportamiento dinámico. Ya que ninguna de las estructuras fue diseñada para estas condiciones, existe la posibilidad que sufran daños extensos e inclusive que colapsen.(Namboothiri, 2017)



Losa contra losa diferente altura

Figura 2.6: Golpeteo entre estructuras de diferente altura

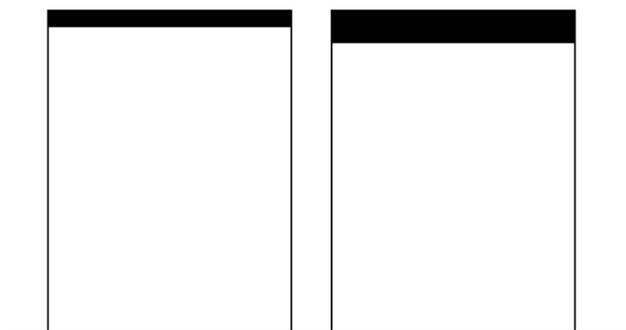
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

4. Estructuras adyacentes con diferentes masas

Debido a que las estructuras adyacentes difieren en su configuración estructural, así como el uso al que está destinado, las masas de cada una de las estructuras son diferentes. Esto se ve reflejado en que cada estructura oscila en diferente fase.(Namboothiri, 2017)

En consecuencia, la transferencia de momento desde la estructura más pesada puede incrementar la velocidad en la estructura más ligera durante

el impacto, en consecuencia, la estructura más ligera es susceptible al colapso.(Cole et al., 2010)



Losa contra losa diferente masa
Figura 2.7: Golpeteo entre estructuras de diferente masa
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5. Estructuras adyacentes con el centro de masa no coaxiales.

En estructuras con centros de masa no coaxiales, la estructura puede golpear en la esquina de la estructura adyacente y causar efectos de torsión, lo cual puede dañar seriamente las columnas de la estructura impactada.(Namboothiri, 2017)

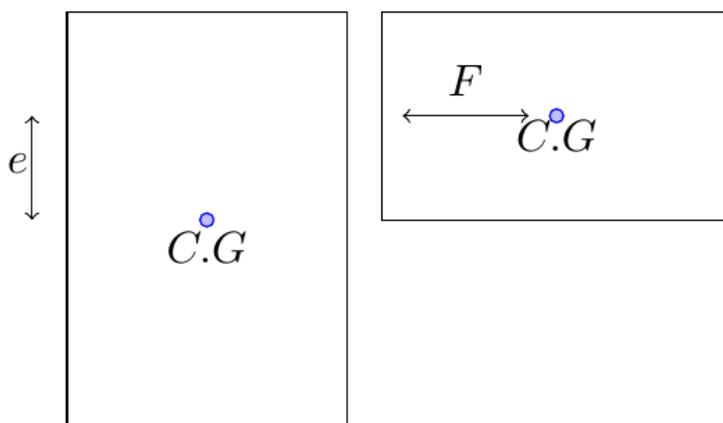
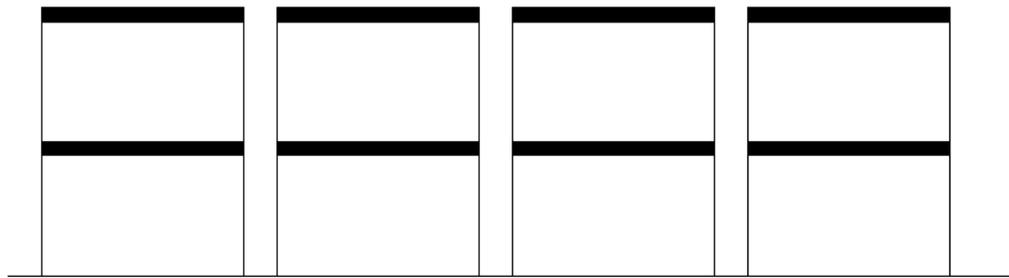


Figura 2.8: Golpeteo entre estructuras con centro de masa no coaxiales
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

6. Estructuras adyacentes con similar vibración.

El impacto se dice que es similar a un péndulo, usualmente este tipo de impacto se observa en construcciones idénticas por ejemplo ciudades pequeñas. En este tipo de impacto, las estructuras oscilan de similar manera ante sismos de gran magnitud, impactando a la última estructura de la serie ocasionando un desplazamiento importante en la estructura impactada.(Namboothiri, 2017)



Estructuras adyacentes con similar vibración

Figura 2.9: Golpeteo entre estructuras con similar vibración

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

2.4 SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para simular el fenómeno del golpeteo se usan diferentes modelos, en un análisis básico generalmente se usa un sistema de un grado de libertad (SDOF) con masas concentradas. Un análisis más detallado se lleva a cabo con un sistema de varios grados de libertad (MDOF), donde la masa de cada piso es concentrada en un punto el mismo que se ubica a nivel de piso. Estos modelos que ayudan al análisis se clasifican en 2 tipos: (Khatiwada & Chouw, 2014)

- Modelo de masa concentrada
- Modelo de masa distribuida

2.4.1 MODELO DE MASA CONCENTRADA

Se asume que la masa de cada piso está concentrada en un punto a nivel de piso como se muestra en la figura (2.10), de modo que el efecto de cada colisión es instantáneo en todo el piso. (Khatiwada & Chouw, 2014)

El modelo de masa concentrada es desarrollado en base a la estereo mecánica, donde se asume un contacto instantáneo y una pérdida de energía definida por e . La principal diferencia con la estereo mecánica es que el modelo de masa concentrada genera fuerzas de contacto con una duración finita. (Khatiwada & Chouw, 2014)

Algunos estudios han empleado modelos elásticos es decir un elemento “GAP” el cual está conformado por un resorte, el mismo que es ubicado en serie en los

probables puntos de golpe. Además, muestran que durante el impacto existe pérdida de energía. Debido a la pérdida de energía la mayoría de modelos incluye un amortiguador viscoso dispuesto en paralelo con el resorte elástico. Con lo cual, cuando el "GAP" está cerrado, la fuerza de golpeteo es calculada con un modelo numérico general de fuerza, como se muestra en la ecuación (2.10). (Khatiwada & Chouw, 2014)

Donde e es el coeficiente de restitución definido por las velocidades relativas antes y después del impacto. Para el presente caso el valor de e es definido al inicio de la simulación como un factor que determina el alcance de la pérdida de energía. (Khatiwada & Chouw, 2014)

$$F_j = f_1(\delta_j) + f_2(e, \delta_j, \dot{\delta}_j) \quad (2.10)$$

Donde:

F_j es la fuerza de golpeteo entre los j pisos.

$\delta_j = u_{1,j} - u_{2,j}$ es la compresión relativa del golpeteo entre pisos.

$\dot{\delta}_j = \dot{u}_{1,j} - \dot{u}_{2,j}$ es la velocidad relativa del golpeteo entre pisos.

e es el coeficiente de restitución.

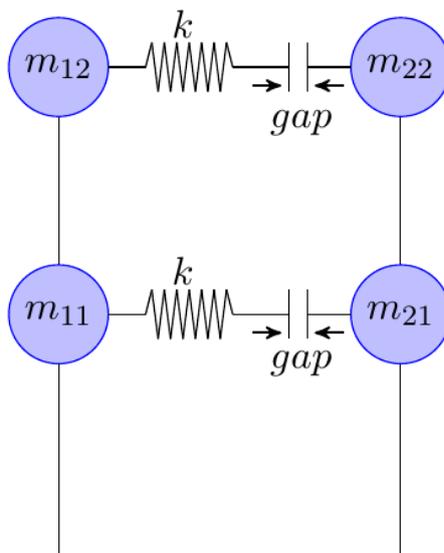


Figura 2.10: Modelo para el análisis del golpeteo: masa concentrada
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

2.4.2 MODELO DE MASA DISTRIBUIDA

El modelo de masa distribuida considera a las losas como diafragmas flexibles como se puede ver en la figura (2.11). Además, este modelo no es afectado por la incertidumbre del coeficiente e . El efecto del golpeo necesita tiempo para propagarse por los pisos. Estos modelos son derivados directamente de la teoría de propagación de ondas de impacto, o han sido validadas en contraposición a esta teoría. (Khatiwada & Chouw, 2014)

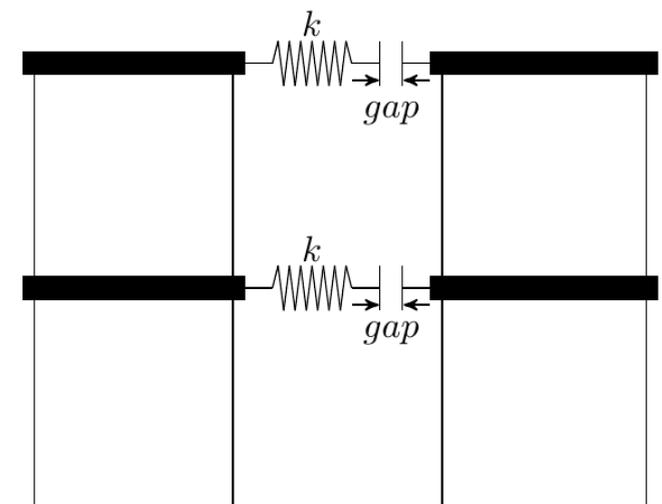


Figura 2.11: Modelo para el análisis del golpeo: masa distribuida
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020).

La teoría de Venant afirma que cuando 2 barras colisionan, las ondas de tensión se generan en ambas barras en el punto de contacto. Estas tensiones se propagan hacia los extremos de las barras, cambiando la velocidad en la sección por donde pasan. Luego se reflejan desde estos mismos extremos lejanos. La separación ocurre cuando la onda reflejada en la barra más corta llega al punto de contacto. (Khatiwada & Chouw, 2014). La duración del contacto y la fuerza de impacto en las barras de idéntico material, área y sección transversal se muestra en la figura (2.12).

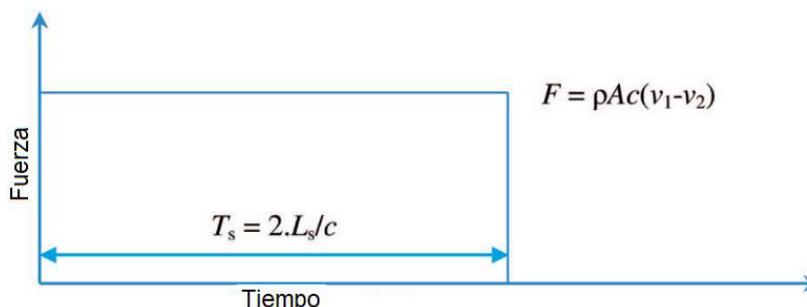


Figura 2.12: Fuerza de golpeo y duración del contacto T_s de la onda de la teoría de impacto

Fuente: (Khatiwada & Chouw, 2014)

Donde L_s es la longitud de la barra más corta, c es la velocidad de propagación de las ondas de compresión en el material, $v_1 - v_2$ es la velocidad relativa de las barras al momento del impacto, ρ y A son la densidad y el área de la sección transversal de las barras respectivamente. (Khaliwada & Chouw, 2014)

2.5 MODELOS DE FUERZA DE COLISIÓN

Existen 2 principales métodos de análisis del golpeo, los métodos clásicos de análisis dinámico y los elementos de contacto. Para el análisis numérico del golpeo, los métodos clásicos de análisis dinámico no son convenientes y su uso es mínimo. Por otro lado, el método de elementos de contacto es usado con mayor frecuencia, es así que cuenta con un modelo matemático que permite cuantificar fuerzas de impacto para el análisis del golpeo. (Zhao, Liu, & Li, 2017)

2.5.1 MODELOS EQUIVALENTES DE GOLPETEO BASADOS EN FUERZA

Usualmente la fuerza de golpeo entre estructuras se simula mediante el uso de elementos de impacto elásticos como se muestra en la figura (2.13a) y visco elásticos como se muestra en la figura (2.13b), los cuales se activan con el contacto. (Jankowski & Mahmoud, 2015)

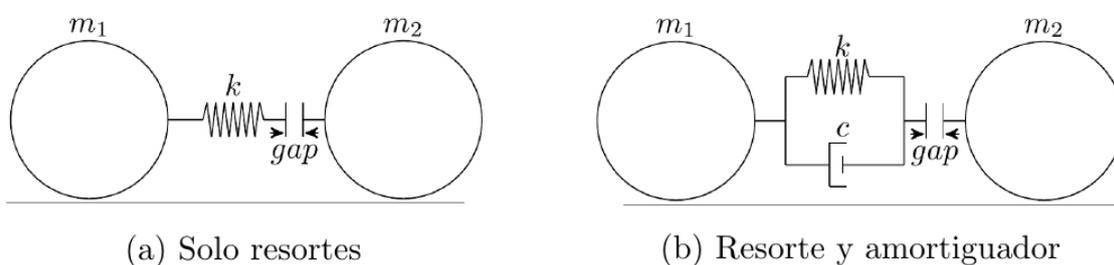


Figura 2.13: Modelos equivalentes de golpeo basados en fuerza

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020).

Los modelos de elementos de contacto están definidos por 2 cuerpos de masas m_1 y m_2 , conectados por un resorte y un amortiguador colocados en serie con una separación igual a la separación entre las estructuras conocida como "GAP". (Khaliwada & Chouw, 2014)

2.5.2 ELEMENTOS "GAP"

Para modelar la colisión entre 2 estructuras, se usa elementos "GAP". Los elementos "GAP" tienen como propósito transferir fuerzas de compresión entre las superficies del modelo computacional y no permitir el desarrollo de fuerzas de tracción cuando las superficies no estén contacto. (Wilson, 1995)

Obtener estas fuerzas de compresión es posible al ubicar un elemento "GAP" conectando 2 nodos adyacentes, localizados en el mismo punto en el espacio.(Rajaram & Kumar, 2015)

El modelo del elemento "GAP" es representado por 2 cuerpos de masa m_1 y m_2 , un resorte equivalente k y un amortiguador equivalente c como se puede ver en la figura (2.14). Los mismos que durante la colisión entre las estructuras nos permiten cuantificar fuerzas y la energía disipada. Este modelo de fuerza de impacto es usado para simular la transferencia del momento.(Zhao et al., 2017)

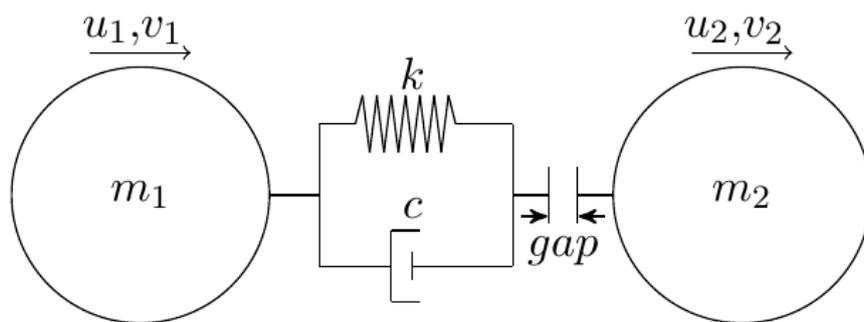


Figura 2.14: Modelo de análisis estructural del golpeo
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020).

Al tiempo t , el desplazamiento de los cuerpos es u_1 y u_2 , sus correspondientes velocidades son v_1 y v_2 . Donde si $u_1 - u_2$ es mayor que la separación del "GAP", los cuerpos están en contacto y la fuerza de golpeo existe caso contrario la fuerza es 0. Todos los modelos calculan la fuerza F en función de la deformación relativa $\delta_j = u_1 - u_2$, y la velocidad relativa $\dot{\delta}_j = v_1 - v_2$.(Khawwaja & Chouh, 2014)

El elemento "GAP" se activa cuando el contacto es detectado, es decir cuando la siguiente condición se satisface(Jankowski, 2004):

$$\delta(t) > 0 \quad (2.11)$$

Donde $\delta(t)$ es expresado mediante la siguiente formula:

$$\delta(t) = u_1(t) - u_2(t) - d \quad (2.12)$$

Donde $u_1(t)$ y $u_2(t)$ son desplazamientos de los miembros estructurales, y d es la separación inicial del "GAP".

2.5.3 MODELOS DE FUERZA DE GOLPETEO

Se han propuesto muchos modelos de fuerza de golpeteo utilizando aproximaciones de masa concentrada. (Khatiwada & Chouw, 2014) Para propósitos de este estudio se consideran los siguientes:

Modelo elástico lineal: este modelo está basado en la teoría clásica de impacto, considera la interacción entre 2 cuerpos colindantes como un resorte lineal como se puede ver en la figura (2.15). Este método es válido únicamente en colisiones rígidas y superficies planas. (Xue et al., 2016)

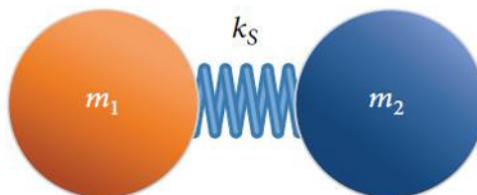


Figura 2.15: Modelo resorte lineal
Fuente: (Xue et al., 2016)

La fuerza durante la colisión puede ser calculada de la siguiente manera:

$$F(t) = k_s \cdot d(t) \quad (2.13)$$

Donde k_s es el parámetro definido por la elasticidad del material y la rigidez del resorte. $d(t)$ es el desplazamiento relativo entre los 2 cuerpos colindantes.

Modelo elástico no lineal (Modelo resorte de Hertz): también llamado modelo de Hertz, está basado en la mecánica de contacto estático. Este modelo es efectivo en golpeteo elástico y superficies de contacto curvas con diferente curvatura. La fuerza de golpeteo puede considerarse como un resorte no lineal entre 2 cuerpos que colisionan y puede calcularse de la siguiente manera:

$$F(t) = k_H \cdot d(t)^{\frac{3}{2}} \quad (2.14)$$

Donde k_H es el parámetro de Hertz que se determina por el material y la geometría de los elementos en contacto.

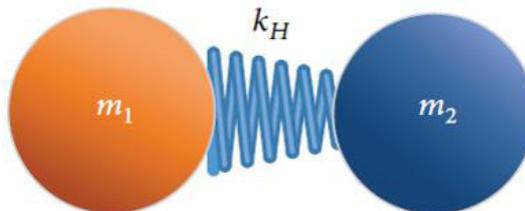


Figura 2.16: Modelo resorte no lineal
Fuente: (Xue et al., 2016)

Modelo Kelvin: este es un modelo lineal visco elástico, el cual toma en cuenta la disipación de energía generada por una deformación durante una colisión. Comparado con un modelo elástico lineal y el modelo elástico no lineal de Hertz, este puede cuantificar la energía disipada a excepción del esfuerzo de tensión al final del proceso de golpeteo. La fuerza en este modelo puede calcularse de la siguiente manera:

$$F(t) = k_K \cdot d(t) + c_K \cdot \dot{\delta}(t) \quad (2.15)$$

Donde k_K es el parámetro de rigidez en el modelo de Kelvin y c_K es el factor de amortiguamiento del amortiguador en el modelo de Kelvin. $\dot{\delta}(t)$ significa la primera derivada con respecto al tiempo. El parámetro c_K no es independiente, pero debe ser calculado en base a las masas de los cuerpos m_1 y m_2 , la rigidez k_K , y el coeficiente de restitución e :

$$c_K = 2 \cdot \xi \sqrt{k_K \cdot \left(\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \right)} \quad (2.16)$$

Donde ξ es:

$$\xi = - \frac{\ln e}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (2.17)$$

El valor de k_K es determinado de manera experimental. Este modelo ha sido utilizado en diversos ensayos, mostrando su efectividad.

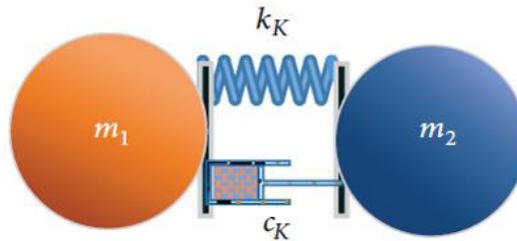


Figura 2.17: Modelo Kelvin
Fuente: (Xue et al., 2016)

Modelo no lineal visco elástico: este es un modelo desarrollado por Jankowski y se basa en el modelo de Kelvin. Este modelo usa una función segmentada para evitar esfuerzos de tensión al final del periodo de restitución.

$$F(t) = k_J \cdot d^{\frac{3}{2}}(t) + c_J \cdot \dot{\delta}(t) \quad (2.18)$$

Cuando el valor de $\dot{\delta}(t) > 0$ se encuentra en el periodo de aproximación como se puede ver en la figura (18), la fuerza puede ser calculada de la siguiente manera:

$$F(t) = k_J \cdot d^{\frac{3}{2}}(t) + c_J \cdot \dot{\delta}(t) \quad (2.19)$$

Cuando el valor de $\dot{\delta}(t) < 0$ se encuentra en el periodo de restitución como se puede ver en la figura (2.18), la fuerza puede ser calculada de la siguiente manera:

$$F(t) = k_J \cdot d^{\frac{3}{2}}(t) \quad (2.20)$$

Donde k_J es el parámetro de rigidez del impacto y c_J es determinado con la siguiente formula:

$$c_J = 2 \cdot \xi_J \cdot \sqrt{k_J \sqrt{\delta(t)} \left(\frac{m_1 \cdot m_2}{m_1 + m_2} \right)} \quad (2.21)$$

Donde ξ_J es:

$$\xi_J = \frac{\sqrt{5} \cdot 1 - e^2}{2 \cdot \pi \cdot e} \quad (2.22)$$

(Xue et al., 2016) han usado este modelo mostrado en la figura (2.18) para calcular el golpeteo en estructuras de varios pisos y puentes.

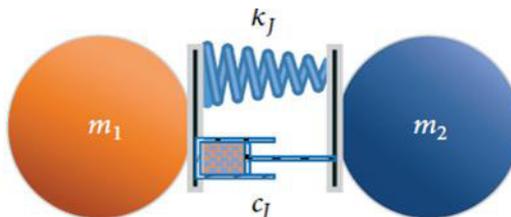


Figura 2.18: Modelo no lineal visco elástico
Fuente: (Xue et al., 2016)

2.5.4 COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN (e)

Es el término utilizado para definir la elasticidad de la colisión, donde si ($e=1$) se define como un choque tipo elástico en el que no existe pérdida de energía cinética durante la colisión. Por el otro lado si ($e=0$) define un choque tipo perfectamente inelástico también llamado plástico, sin embargo, esto no quiere decir que se ha perdido toda la energía cinética del sistema y finalmente si se tiene valores intermedios ($0 < e < 1$) define un choque tipo inelástico con pérdida de energía cinética en la que la energía se transforma a otros tipos de energía expresada en calor, sonido, daño entre otros. Como se puede observar en la figura (2.19) se muestra la relación entre el porcentaje de energía cinética perdida y el coeficiente de restitución (Khatiwada & Chouw, 2014).

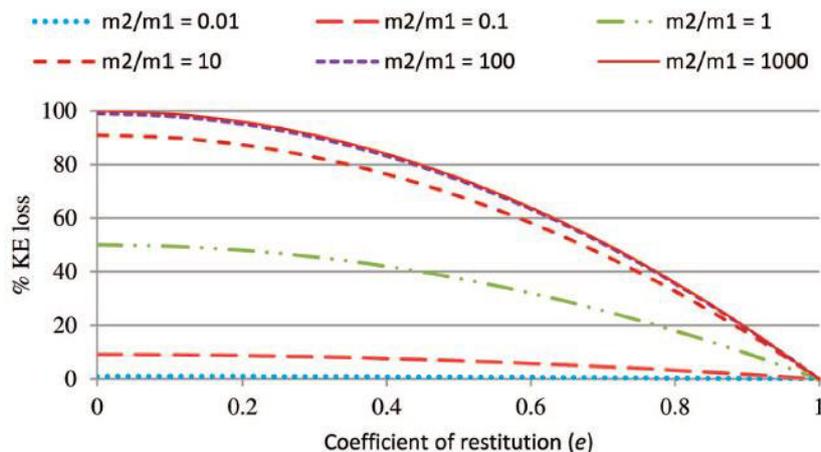


Figura 2.19: Coeficiente de restitución e
Fuente: (Khatiwada & Chouw, 2014)

El planteamiento inicial del coeficiente de restitución se lo hace mediante conceptos de impulso y cantidad de movimiento en los periodos de aproximación y restitución por separado, relacionando masas y velocidades antes y después de la colisión, como se muestra en la Ecuación 2.23, sin embargo, está limitada cuando no se conoce la velocidad final.

$$e = \frac{\dot{x}_2' - \dot{x}_1'}{\dot{x}_1 - \dot{x}_2} \quad (2.23)$$

Donde:

$e = e$: Coeficiente de restitución

$\dot{x}_1 ; \dot{x}_2 = \mathbf{ve1}$: velocidad antes de la colisión de las estructuras colindantes

$\dot{x}_1' ; \dot{x}_2' = \mathbf{ve1}$: velocidad después de la colisión de las estructuras colindantes

Existen metodologías para obtener este coeficiente experimentalmente, uno de ellos es presentado en (Jankowski 2010) que logra obtener un valor básico de coeficiente de restitución y rangos de valores, dejando caer una esfera sobre una placa masiva hecha ambos del mismo material (ver Figura 2.20) y relacionándola mediante la ecuación (2.24).

En estas condiciones de experimentación la ecuación (2.23) se simplifique a la ecuación (2.25) ya que el suelo no tiene velocidad en ningún momento de la colisión y esto debe también sucederle en la esfera en el punto de máxima deformación. (Jankowski & Mahmoud, 2015)



Figura 2.20: Ensayo experimental para obtener e .

Fuente: (Jankowski & Mahmoud, 2015)

$$e^2 = \frac{h^*}{h} \quad (2.24)$$

Donde:

h^* = Altura de rebote = Altura inicial

$$e = \frac{-\dot{x}_1'}{\dot{x}_1} \quad (2.25)$$

Con las ecuaciones (2.24) y (2.25), se tabula el coeficiente de restitución con la velocidad antes del choque también llamada velocidad de pre-impacto (ver figura 3.3.)

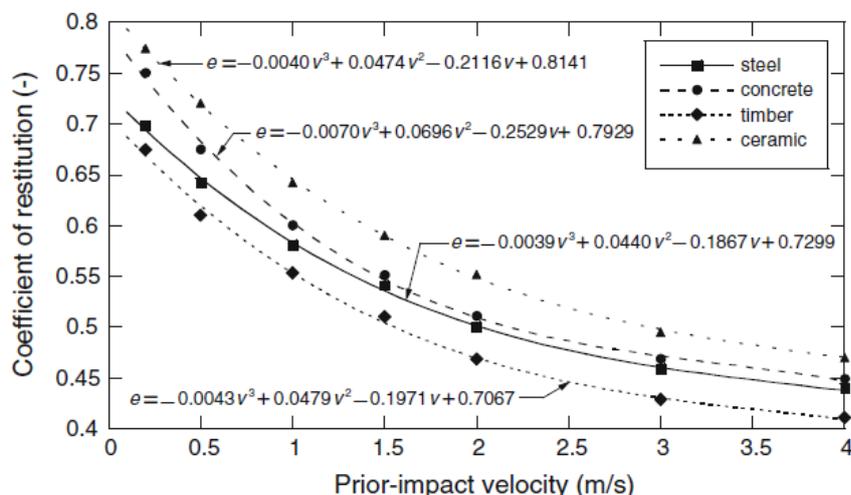


Figura 2.21: Coeficiente de restitución en función de la velocidad de pre-impacto
Fuente: (Jankowski & Mahmoud, 2015)

Sin embargo, no parece racional medir el coeficiente de restitución para una esfera que cae al suelo debido a la aceleración gravitacional y luego adoptar el mismo valor en la simulación de colisión de edificios. Esto se debe a que, en el caso de los golpes en edificios, se involucran masas similares y no necesariamente se activará la aceleración de la gravedad en la dirección de la colisión.

Además, que en el momento que entren en contacto las dos estructuras tendrán su propia velocidad diferente de cero (Khatiwada & Chouw ,2014).

Dado que la definición del coeficiente de restitución solo incluye la velocidad, esto fuerza únicamente a una conservación de la energía cinética y no la energía mecánica total. Las estructuras pueden almacenar energía mecánica como energía de tensión y liberarla como energía cinética más adelante. Por lo tanto, los modelos basados en el coeficiente de restitución no se pueden aplicar cuando existe golpeteo losa - columna, ya que las columnas tienen una masa más pequeña y la energía cinética de los pisos se almacena como tensión en las columnas. (Khatiwada & Chouw ,2014).

Por lo mencionado, este coeficiente tiene que ser estudiado desde otros enfoques, sin embargo, a través de varios estudios experimentales el valor del coeficiente de restitución suele oscilar entre 0,4 y 0,8 en el caso de colisiones entre elementos estructurales hechos de materiales de construcción y el valor que típicamente usado es ($e=0.65$ [-]) lo que implicaría una colisión tipo inelástica. (Jankowski & Mahmoud, 2015)

2.5.5 AMORTIGUAMIENTO DE IMPACTO (ξ)

Los diferentes modelos de fuerza de colisión que incluyen amortiguadores viscosos definen la relación de amortiguamiento de impacto en función del coeficiente de restitución. Un ejemplo de ello es la ecuación (2.26) propuesta en el modelo viscoelástico no lineal de Jankowski (Khatami, Nadepour, Barros, Jkubczyk, & Jankowski, 2019).

Sin embargo, los resultados obtenidos para diferentes modelos indican que su uso conduce a resultados diferentes visibles para el mismo valor de coeficiente de restitución (ver Figura 2.22) donde se ocupa un $e=0.5$.

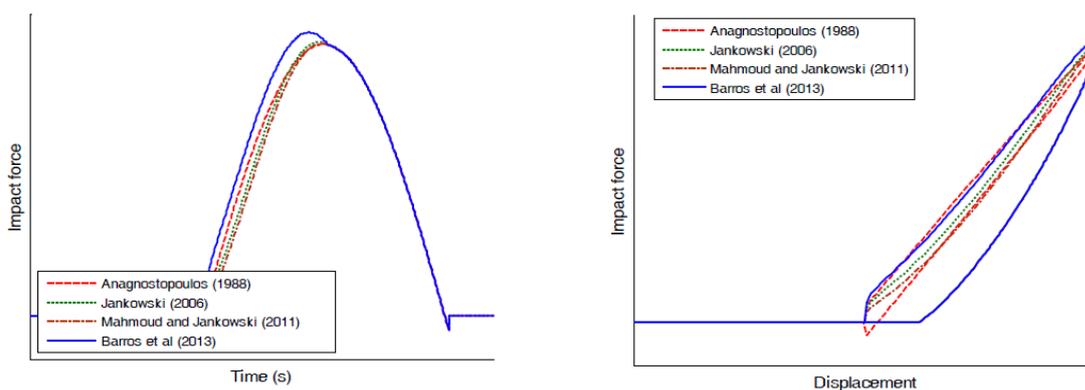


Figura 2.22: Comparación diferentes modelos de colisión diferente ξ y el mismo e
Fuente: (Khatami, Nadepour, Barros, Jkubczyk, & Jankowski, 2019)

Por lo tanto, es necesario justificar la ecuación para la relación de amortiguación de impacto para determinar con precisión todas las respuestas durante los terremotos. Con el fin de definir el parámetro en una forma más general, se ha diseñado un proceso iterativo utilizando el programa de optimización CRVK (coeficiente de restitución-velocidad-rigidez) que en este trabajo no está tomado en cuenta, pero puede ser implementado en posteriores estudios (Khatami et al., 2019).

$$\bar{\xi} = 0.31 \text{ [-]}$$

$$\bar{\xi} = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{1 - e^2}{e(e(9\pi - 16) + 16)} \quad (2.26)$$

Donde:

$\bar{\xi} = \mathbf{zeta}$: Relación de amortiguamiento de impacto con e

2.5.6 RIGIDEZ DE IMPACTO ($\bar{\beta}$)

La rigidez de contacto k es una parte integral de todos los modelos de fuerza elásticos y viscoelásticos. Desafortunadamente, no hay un método aceptado para determinar este valor. Analíticamente la única fórmula para determinar el valor de k es la propuesta por Hertz. Sin embargo, los resultados obtenidos no concuerdan con las fuerzas de contacto experimentales de superficies esféricas con superficies planas. (Khatiwada & Chouw, 2014)

Adicionalmente, la ley de Hertz no está formulada para contacto de superficies planas como en las estructuras. La rigidez de los elementos lineales se ha relacionado con la rigidez axial de las losas, pero estos valores están sobreestimados de acuerdo con los experimentos con los que han sido comparados. (Khatiwada & Chouw, 2014)

La rigidez de contacto tiene un efecto considerable en las fuerzas de golpeteo y la aceleración de las masas durante el contacto, pero un efecto despreciable en la respuesta de desplazamiento de la estructura. (Khatiwada & Chouw, 2014)

La incapacidad de establecer una rigidez de contacto tiene las siguientes consecuencias:

La fuerza de golpeteo no es confiable, además cuantificar el daño en la zona del golpeteo no es posible. Solo se puede cuantificar una respuesta global y posibles daños de manera global pueden ser calculados.

La respuesta global puede ser significativamente sobreestimada o subestimada dependiendo del valor de k . Varios estudios han sido realizados para solventar este inconveniente, los cuales sugieren varios criterios para asignar el valor de la rigidez

al resorte del elemento "GAP". Estos son los siguientes(Noman, Alam, Fahad, Shahzada, & Kamal, 2016):

- Wada et al, incorporaron un elemento "gap" con una rigidez igual a la rigidez axial de las columnas y losa en el nivel de impacto.
- Anagnostopoulos y (Abdel Raheem et al., 2019) sugieren un elemento "gap" con un coeficiente de rigidez igual a 20 veces la rigidez lateral de la estructura más rígida del sistema de un solo grado de libertad(SDOF).
- Maison and Kasai proponen un valor de rigidez correspondiente a la rigidez axial del nivel de piso donde se asume que habrá contacto.
- (Guo, Cui, & Li, 2012) indica que la rigidez del elemento "gap" corresponde a la rigidez axial de los cuerpos en contacto.

La rigidez de impacto es el parámetro que genera mayor incertidumbre dentro de la modelación de la fuerza de colisión ya que no existe un método determinado para calcular su valor. Únicamente existen recomendaciones en la que ninguna es aborda a profundidad dos de estas recomendaciones se estudian en el capítulo 4 (Khatiwada & Chouw ,2014).

A pesar de ello se están proponiendo ecuaciones teóricas que acerquen a este valor, muestra de ello es el estudio realizado en 2017 que determina una fórmula de rigidez de impacto para el modelo de fuerza de colisión viscoelástico lineal, en el que se encuentran valores menores a los sugeridos en otras investigaciones que contaron con una parte experimental (Xu, Xu, Liu, Zhou, 2017).

Por lo tanto, en la mayoría de simulaciones numéricas se toman valores sugeridos de investigaciones experimentales, en donde solo se llega a mencionar que se obtuvo de un proceso iterativo al igualar la fuerza de colisión máxima determinada a través de simulaciones numéricas con la fuerza de colisión máximo obtenido de la experimentación, para el actual capítulo todos los modelos consideran el valor de rigidez expresada a continuación (Khatami et al., 2019).

$$\bar{\beta} = 8.32e9 \left[\frac{N}{m^2} \right] \cdot m^{\frac{1}{2}}$$

$\bar{\beta}$ = **beta**: Rigidez de impacto

2.6 FUERZA DE GOLPETEO

Experimentalmente los resultados muestran que la fuerza de golpeteo durante el impacto depende substancialmente de algunos factores como: masas de los elementos colindantes, sus velocidades relativas antes del impacto, propiedades estructurales de los materiales, la geometría de la superficie de contacto antes del impacto y también impactos previos. (Jankowski & Mahmoud, 2015)

Un análisis tiempo historia de la fuerza de golpeteo nos muestra que hay dos fases como se observa en la figura (2.20). El periodo de acercamiento empieza cuando el contacto empieza y dura hasta el pico de la deformación. Después es seguido por el periodo de restitución el cual llega a su final cuando los 2 cuerpos se separan. Al inicio del periodo de acercamiento se atribuye un comportamiento elástico de los materiales, pero pronto se producen deformaciones plásticas, grietas locales o aplastamientos. En el periodo de restitución, la energía de deformación elástica acumulada se libera sin efectos plásticos. (Jankowski & Mahmoud, 2015)

La mayoría de la energía disipada durante el impacto se pierde en el período de acercamiento de la colisión, mientras que una cantidad relativamente pequeña de energía se disipa durante el período de restitución. (Jankowski & Mahmoud, 2015)



Figura 2.23: Grafica tiempo historia de la fuerza de golpeteo
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Los resultados experimentales muestran que, durante el periodo de acercamiento, usualmente existe un incremento rápido de la fuerza de golpeteo. Mientras, en el periodo de restitución, la fuerza disminuye lentamente, por lo general esta fuerza se reduce más, instantes antes de separarse. Esto puede ser observado en la figura (2.21). La relación entre la fuerza de golpeteo y la deformación no es lineal, existe un gran incremento en los valores de la fuerza de golpeteo para largas deformaciones. (Jankowski & Mahmoud, 2015)

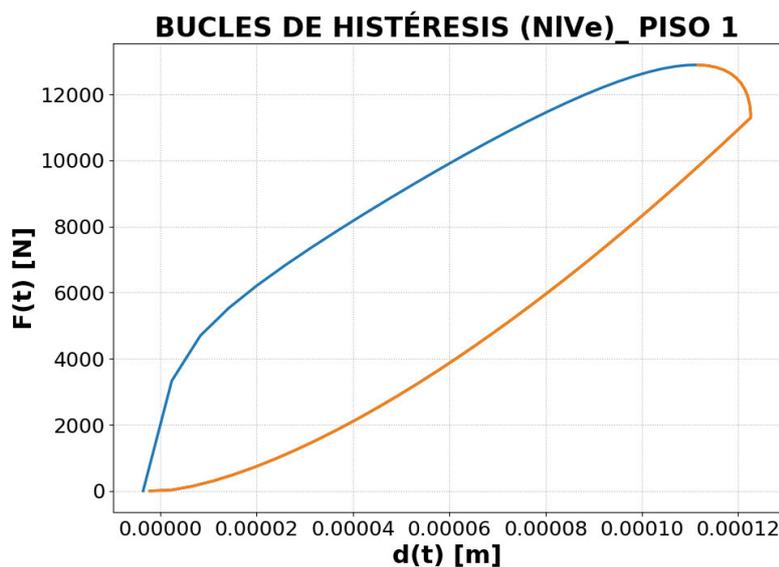


Figura 2.24: Grafico fuerza vs deformación.

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Al momento de simular el comportamiento de las estructuras debemos considerar que mientras las estructuras no están en contacto, estas se pueden analizar con cualquier método de integración tiempo historia. Cuando las estructuras están en contacto es decir el elemento “gap” se encuentra cerrado, se emplea un modelo de fuerza para simular la transferencia de momento. (Jankowski & Mahmoud, 2015)

2.7 ZONAS DE INTERÉS EN DESPLAZAMIENTOS NODALES

Producto de la acción de las fuerzas de colisión existen variaciones en la amplitud de los desplazamientos nodales con respecto a las estructuras sin

golpeteo para evidenciar las influencias se han decidido analizar 3 zonas específicas (ver Figura 2.25). A estas zonas las llamaremos a partir de ahora:

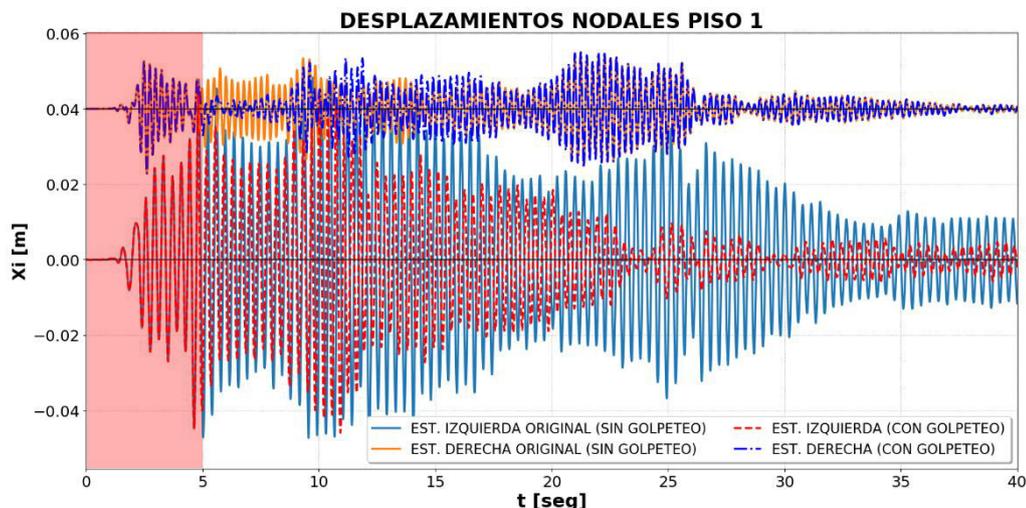


Figura 2.25: Desplazamientos nodales sin golpeteo y con golpeteo
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

- Zona de certeza. (Recuadro Rojo)

Es la zona en la cual todavía no existe el “PRIMER IMPACTO” por lo tanto no debe existir variación en los desplazamientos nodales independiente del modelo de fuerza de colisión a usar (ver Figura 2.27 a).

- Zona del primer impacto. (Recuadro Azul)

Es la zona donde deben aparecer las primeras variaciones durante y después del primer impacto y están en función del modelo de fuerza de colisión elegido y como se calculan los parámetros que exige (Rigidez de impacto, Amortiguamiento de impacto).

Si existe un primer impacto las fuerzas de colisión que se generan determinan el comportamiento posterior de las estructuras, por lo tanto, es imprescindible asegurar un valor adecuado de fuerza de colisión para obtener resultados fiables.

- Zona del primer punto de inflexión después del primer impacto (Recuadro Verde) (EST. IZQUIERDA).

Es la zona observada, después de la primera fuerza de colisión que genera un incremento o disminución de la amplitud en los desplazamientos nodales, está directamente relacionada con la zona del primer impacto y en la siguiente imagen se enfoca solo en la estructura izquierda.

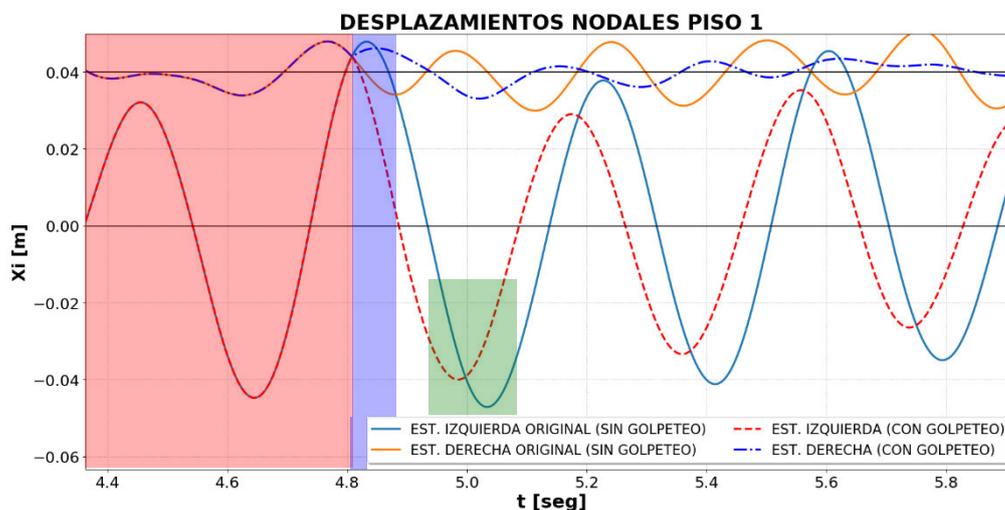
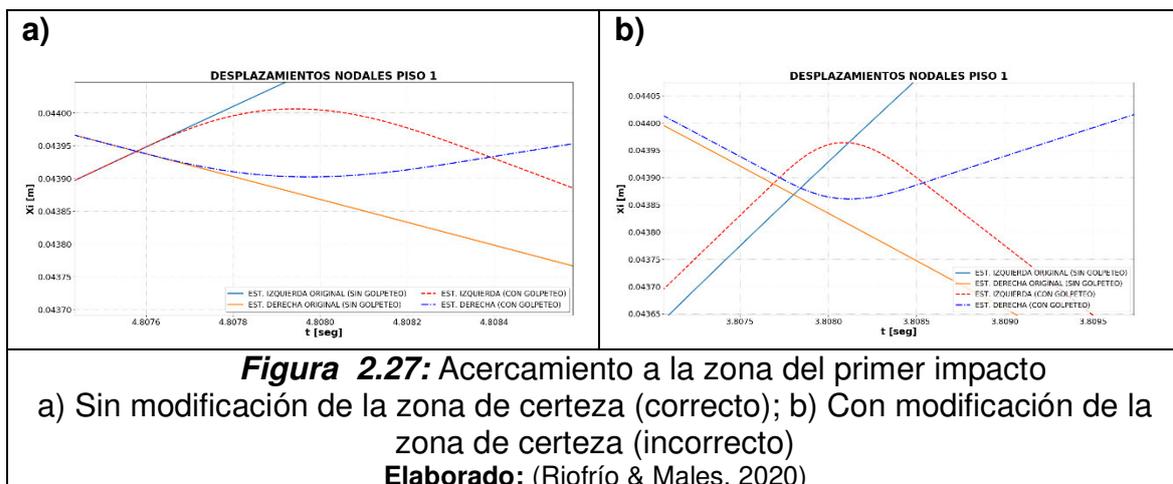


Figura 2.26: Zonas de interés
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)



CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA MODELACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN OPENSEES

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Con el objetivo de simplificar la redacción y entendimiento al lector se le asigna una nomenclatura única (ver Tabla 3.1) para cada caso experimental.

Tabla 3.1:

Desventajas de los modelos de fuerza de colisión

NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	PAPER
CASO 1	SDOF	<i>Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials (Jankowski, 2010).</i>
CASO 2	MDOF	Shake table test of structures subject to pounding (Crozet, Pilopoulos & Chaudat, 2019).
CASO 3	MDOF	Analytical prediction of experimental building pounding (Filiatrault & Wagner, 1995)

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.2 ELECCIÓN SOFTWARE

El software elegido es OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation), que permite analizar modelos estructurales y geotécnicos bajo cargas gravitacionales y dinámicas, causadas por peligros naturales. La principal ventaja sobre programas comerciales es que OpenSees cuenta con licencia libre, lo que permite al usuario tener acceso a cada una de las funciones disponibles para utilizarlas, modificarlas e incluso advertir posibles errores, lo que ocasiona que este en constante desarrollo y transformación. Los investigadores del PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) y de otras instituciones, han logrado generar una gran biblioteca de comandos para definir materiales, elementos, condiciones especiales y procedimientos de análisis lineal y no lineal (Velasco & Guerrero, 2020).

Cualquier desarrollo en OpenSees es mediante líneas de código, principalmente mediante instrucciones en lenguaje de programación TCL (Tool Command Language) para su uso en el editor de texto por defecto provista al descargar OpenSees, el cual no es nada amigable para el usuario principiante. Además, en la mayoría de casos solo se puede hacer el pre-procesamiento y análisis de las simulaciones y se necesita de una herramienta como Matlab o Excel para el post-procesamiento de los resultados (Velasco & Guerrero, 2020).

Sin embargo, desde 2017 existe la posibilidad de realizar las instrucciones mediante lenguaje de programación Python utilizando el módulo "OpenSeesPy" desarrollado por Minjie Zhu, y que logra superar las dificultades antes mencionadas. El módulo puede ser utilizado en un editor de texto más amigable como Spyder que posee un GUI (graphical user interface) muy similar al de Matlab, proveyendo de ventajas adicionales como la detección del lugar donde exista errores de programación (Zhu, McKenna & Scott, 2017).

Debido a lo anterior, el editor de texto Spyder, el lenguaje de programación Python y OpenSees, son la combinación idónea para alcanzar los objetivos. Para todos los casos de estudio, se añade líneas de código dentro de un análisis dinámico para captar las fuerzas de choque.

3.3 MODELOS CONSTITUTIVO DE MATERIALES

El estudio y modelación computacional del golpeteo estructural exige se considere la incorporación del comportamiento inelástico de materiales, ya que se ha observado que este fenómeno puede provocar desde deformaciones permanentes hasta el colapso de la estructura (Jankowski & Mahmoud, 2015).

Por lo tanto, es muy importante seleccionar un modelo de material que replique el comportamiento real lo mejor posible, procurando un equilibrio con el costo de procesamiento computacional. Para los 3 casos, todos los elementos vigas y columnas de acero estructural, se utiliza el modelo de comportamiento de material

“Steel 01” (ver Figura 3.1.), que representa un comportamiento bilineal elástico perfectamente plástico con endurecimiento cinemático y permite la opción de describir endurecimiento isotrópico en la región plástica no lineal (Mazzoni, McKenna, Scott, & Fenves, 2006):

Donde los parámetros de entrada son:

fy: Esfuerzo de fluencia (Esfuerzo al cual se produce la fluencia).

E0: Módulo de elasticidad inicial (pendiente del tramo elástico lineal).

b: Relación de endurecimiento por deformación (Relaciona las pendientes de la zona plástica con la zona elástica).

a1 y a2: Endurecimiento isotrópico en compresión.

a3 y a4: Endurecimiento isotrópico en tensión.

Tomando en cuenta que los parámetros de endurecimiento isotrópico pueden ser opcionales.

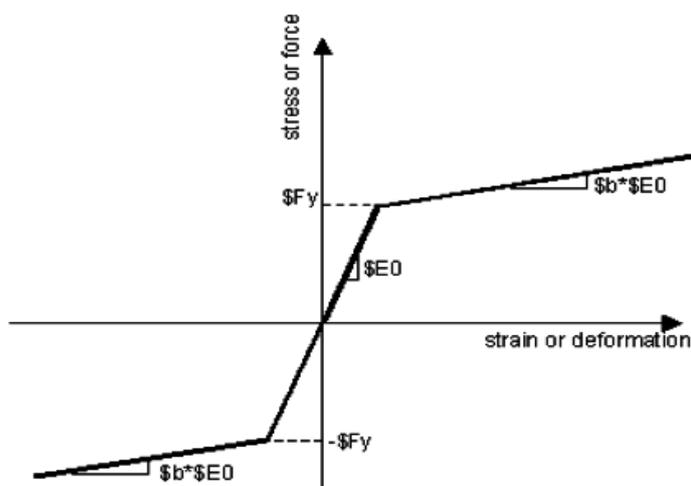


Figura 3.1: Curva esfuerzo deformación material ‘STEEL01’

Fuente: (Mazzoni, McKenna, Scott, & Fenves, 2006)

Para los cables de acero de los casos 2 y 3 se recurrió al modelo de comportamiento de material “Elastic Perfectly Plastic with Gap” (ver Figura 3.2.), que consiste en un rango elástico y un rango perfectamente plástico. El modelo está en capacidad de trabajar solo a tensión o solo a compresión y el signo de f_y determina como va a comportarse (Arash, Soroushian, Echeverria, Maragakis, & Bagtzoglou, 2016). Donde los parámetros de entrada son:

E: Módulo de elasticidad inicial (pendiente del tramo elástico lineal).

f_y : Esfuerzo de fluencia (Esfuerzo al cual se produce la fluencia).

gap: Condición inicial de brecha (deformación inicial).

eta: Relación de endurecimiento por deformación (Relaciona las pendientes de la zona plástica con la zona elástica, puede ser negativo).

damage: Daño acumulado en el material.

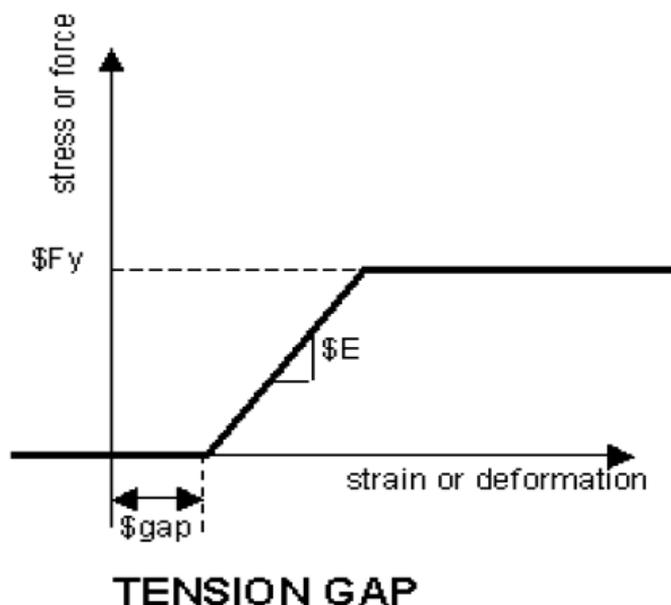


Figura 3.2: Curva esfuerzo deformación material “Elastic Perfectly Plastic with Gap” (Tensión)

Fuente: (Mazzoni et al., 2006)

3.4 TRATAMIENTO DE ACELEROGRAMAS

Debido a que los acelerómetros y condiciones de campo pueden generar posibles datos erróneos es necesario corregir los acelerogramas para modificarlos ante el posible desfase con respecto a la línea base y en una etapa posterior corregir el ruido de fondo, la modificación se realizó con la ayuda de código desarrollado en Matlab por el Ingeniero David Mora (ver en las figuras 3.3 & 3.4), para una descripción más a detalle de este procedimiento se puede recurrir a (Aguilar & Arias, 2019).

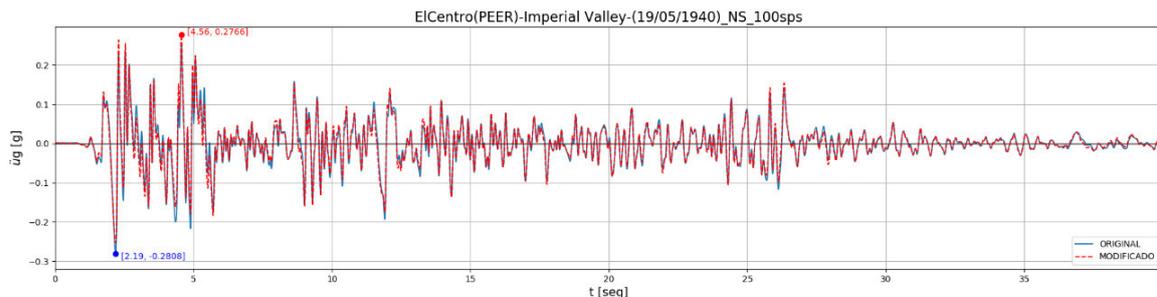


Figura 3.3: El Centro acelerograma original vs modificado
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

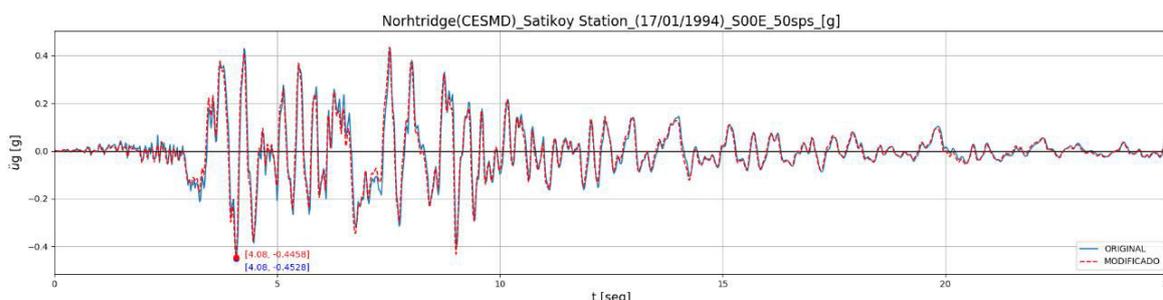


Figura 3.4: Northridge acelerograma original vs modificado
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Los datos originales fueron obtenidos de PEER Ground Motion Database y de CESMD (Center for Engineering Strong Motion Data). Donde el acelerograma de El Centro se utiliza en los casos 1 y 3, mientras que Northridge es utilizado únicamente para el caso 2.

3.5 DEFINICIÓN DE MODELO ANALÍTICO DE LA FUERZA DE CHOQUE

En las librerías de OpenSees existen algunos elementos que permiten simular fenómenos de impacto y fricción como el llamado ZeroLengthImpact3D, que ha dado buenos resultados en investigaciones de cielos raso y de puentes, ambos contando con una parte experimental con lo cual se podía calibrar muchos de los parámetros que exige este tipo de elemento (Arash et al., 2016; Isakovic, Saidi & Fischinger, 2013).

Tomando como referencia algunos de los parámetros de las investigaciones mencionadas se desarrolló un modelo con elemento ZeroLengthImpact3D el cual fue monitoreado con el comando 'recorder,' más sin embargo se obtuvo resultados un tanto desfasados del lugar donde se generaban los contactos es así que se

decidió descartarlos de los modelos y desarrollar una función que permita introducir un modelo analítico de fuerza de impacto.

El modelo seleccionado para cuantificar las fuerzas de choque seleccionado para este estudio, es el “viscoelástico no lineal” propuesto por Robert Jankowski en 2005 con el propósito de incluir o modificar procesos que suceden en el momento del choque basándose en experiencia propia y de otros investigadores (Kharazian & Almansa, 2017).

Así pues, se intenta superar incongruencias evidenciadas en la modelación y que no corresponden con la teoría y la experimentación. Con la finalidad de mostrar la evolución que se tuvo para alcanzar el modelo seleccionado se muestra un recuento de otros modelos con sus desventajas e incongruencias (ver Tabla 3.2) (Jankowski & Mahmoud, 2015).

Tabla 3.2:

Desventajas de los modelos de fuerza de colisión

MODELO	DESVENTAJAS E INCONGRUENCIAS	
Modelo Elástico Lineal	No toma en cuenta la energía de disipación durante la colisión.	La relación fuerza vs deformación relativa no es muy realista.
Modelo Viscoelástico Lineal = (Kelvin-Voigt model)	Se genera una fuerza de choque negativa antes de la separación de los cuerpos.	
Modelo Viscoelástico Lineal (Modificado)		
Hertz Non-linear Elastic Model	La base teórica para el resorte (ley de Hertz) es totalmente elástico.	
Hertz damp Non-linear Model	No toma en cuenta la energía disipada debido a deformaciones plásticas, agrietamientos, fricción entre otros.	

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

La función creada para adaptar el modelo de colisión al análisis transitorio de OpenSees se llama **Dynamic_WITH_Pounding_NIVe** y todas las variables relevantes están descritas durante la metodología a partir de este punto.

3.5.1 DESPLAZAMIENTO Y VELOCIDAD RELATIVA ($\delta(t)$ y $\dot{\delta}(t)$)

El comportamiento y los intervalos en los que se activan los modelos de fuerza de colisión están en función de velocidades y desplazamientos nodales de

estructuras colindantes y que serán relacionadas mediante las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3) respectivamente.

En todos los casos un modelo de fuerza de colisión, implícitamente existe el requerimiento que en la respuesta tiempo historia de desplazamientos de nodos colindantes exista superposición en el lugar se espera la colisión, pero no existe parámetros establecidos de hasta qué punto puede llegar la superposición, por lo que este es otro parámetro de incertidumbre que dificulta el obtener resultados comparables.

$$\delta(t) = x_1(t) - x_2(t) - d \quad (3.1)$$

$$\dot{\delta}(t) = \dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t) \quad (3.2)$$

$$\bar{c} = 2\bar{\xi} \sqrt{\bar{\beta} \sqrt{\delta(t)} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad (3.3)$$

Donde:

$x_1 ; x_2 = \mathbf{ue1_i}$: Desplazamientos nodales de las estructuras colindantes

$\dot{x}_1 ; \dot{x}_2 = \mathbf{ve1_i}$: Velocidades nodales de las estructuras colindantes

$m_1 = \mathbf{m_t_t1_1}$: Masa traslacional (estructura 1_piso 1)

$m_2 = \mathbf{m_t_t2_1}$: Masa traslacional (estructura 2_piso 1)

$\delta(t) = \mathbf{UDFI_i}$: Desplazamiento Relativo

$\dot{\delta}(t) = \mathbf{vedif_i}$: Velocidad Relativa

$\bar{c} = \mathbf{c_i}$: Amortiguamiento del elemento de impacto

3.5.2 MODELO VISCOELÁSTICO NO LINEAL

Este modelo de fuerza de colisión diferencia tres etapas durante la colisión, mediante el desplazamiento y velocidad relativa y cada una son descritas mediante las ecuaciones (3.4), (3.5) y (3.6) respectivamente.

Etapas 1

Si el desplazamiento relativo es menor que cero, no existe contacto. ($\delta(t) \leq 0$)

$$F(t) = 0 \quad (3.4)$$

Etapa 2

Si el desplazamiento relativo y la velocidad relativa es mayor que cero, existe contacto (periodo de aproximación). ($\delta(t) > 0$; $\dot{\delta}(t) > 0$)

$$F(t) = \bar{\beta}\delta^{3/2}(t) + \bar{c}(t)\dot{\delta}(t) \quad (3.5)$$

Etapa 3

Si el desplazamiento relativo es mayor que cero y la velocidad relativa es menor o igual a cero, existe contacto (periodo de restitución).

($\delta(t) > 0$; $\dot{\delta}(t) \leq 0$)

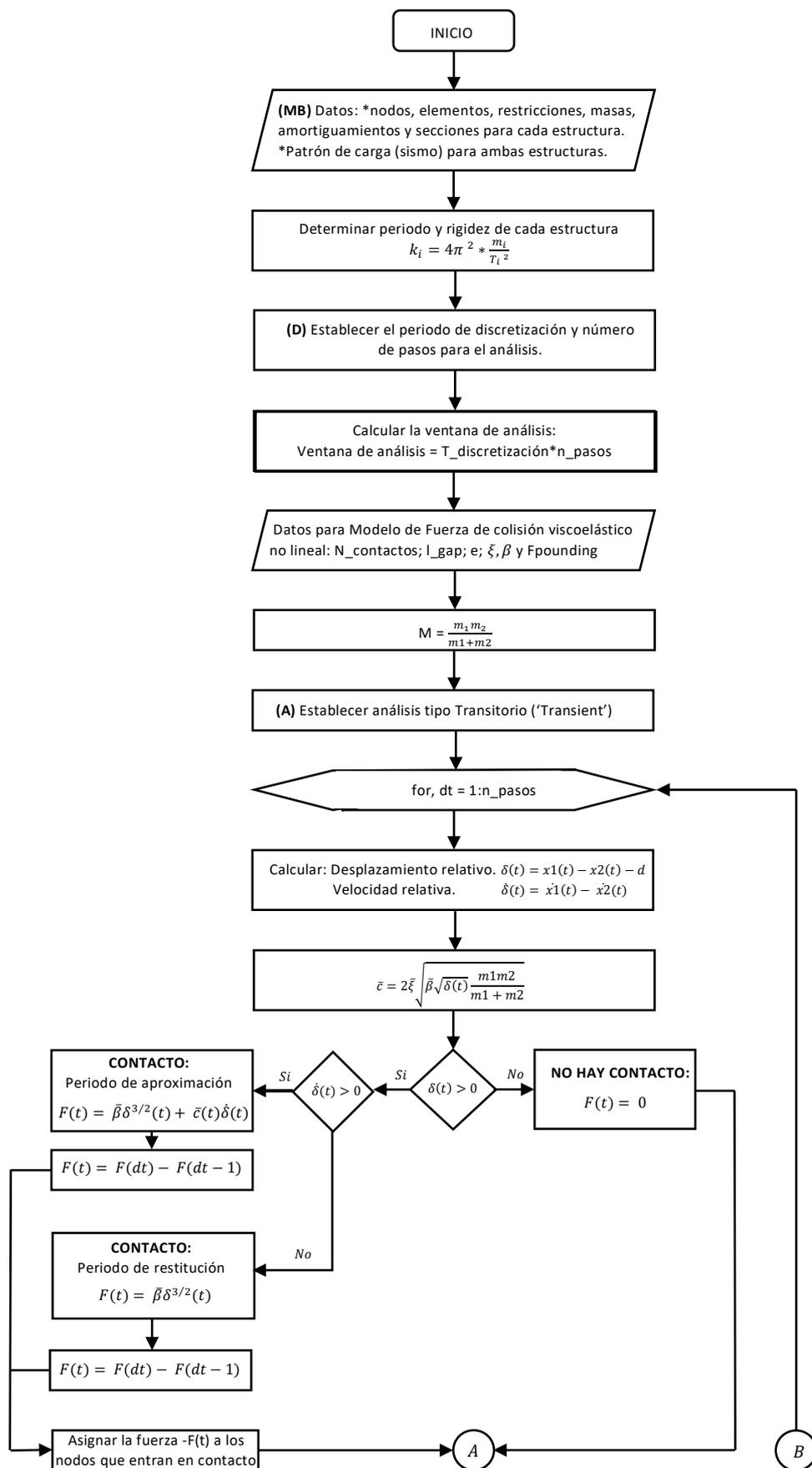
$$F(t) = \bar{\beta}\delta^{3/2}(t) \quad (3.6)$$

Donde:

$F(t) = \mathbf{F}_{gap}$: Fuerzas de colisión

3.5.3 DIAGRAMA DE FLUJO

El diagrama propuesto (ver Figura 3.5.) es una adaptación y modificación del realizado en Matlab en el año 2012 por (Yaghmaei & Jalali, 2012). El diagrama muestra teóricamente los pasos que se debe seguir para calcular las fuerzas de colisión y los bucles de histéresis que encierran la energía disipada. Para complementar el entendimiento del diagrama de flujo en el **Anexo #1** se puede encontrar un ejemplo de uso y en el **Anexo #2** el código a detalle.



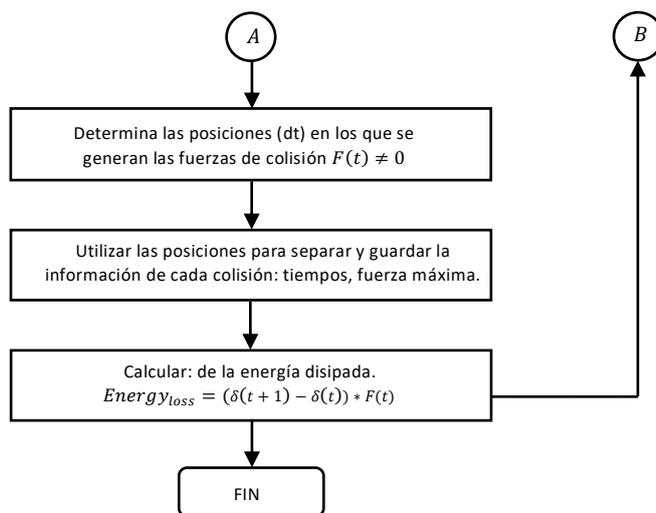


Figura 3.5: Diagrama de flujo para cálculo de Fuerzas de Colisión y bucles de histéresis. Programa: *Dynamic_WITH_Pounding_NIVe*
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.6. ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

El análisis dinámico es un método de análisis en el que se estudia el efecto que tiene un evento sísmico sobre un sistema estructural, y se puede considerar tiempo historia debido a que se analiza el efecto que genera el acelerograma punto por punto en función del tiempo y el respectivo desplazamiento y los efectos que produce en las plantas de la estructura (Aguilar & Arias, 2019).

El método de solución más general para el análisis dinámico es el método incremental donde las ecuaciones de equilibrio se resuelven en cada instante de tiempo también llamado periodo de discretización Δt . Existen muchos métodos de solución. En general, implican la solución de un sistema de ecuaciones de equilibrio en cada incremento de tiempo. En el caso del análisis no-lineal, puede ser necesario estimar la matriz de rigidez del sistema estructural completo en cada instante de tiempo ya que se puede ir degradando. También, se puede requerir de varias iteraciones para satisfacer el equilibrio en cada incremento de tiempo. Como resultado de los elevados requerimientos de computación, la solución de sistemas estructurales con apenas unos cientos de grados de libertad puede tomar mucho tiempo (Wilson, 2004).

Además, para obtener soluciones estables, la mayoría de los métodos de solución incremental deben incluir el amortiguamiento artificial o constante. Por este motivo, hay que tener cuidado en la interpretación de los resultados y tener en cuenta que son aproximaciones. Para algunas estructuras que incursionan en el rango no lineal que están sujetas a movimientos sísmicos, los métodos de solución incremental son necesarios (Wilson, 2004). Para el presente trabajo se utilizó el método de Newmark con $\alpha=0.5$ y $\beta=0.25$ para la solución de los sistemas de ecuaciones y distintos periodos de discretización.

3.6.1 ANÁLISIS DINÁMICA SIN FUERZA DE CHOQUE.

Para empezar a analizar la presencia de golpes se recomienda como primer paso observar la respuesta dinámica original de las dos estructuras en un mismo gráfico con la separación correspondiente, con la finalidad de saber si las estructuras llegan a estar en contacto durante el tiempo que dure el evento sísmico.

Además, se puede observar en qué puntos va a existir mayor presencia de contactos y en las que no, lo que se permite poner a consideración el prescindir de secciones de análisis, que resultarían en la reducción del tiempo de cálculo, lo cual va a ser muy útil, ya que para esta clase de análisis pueden llegar a tener alto costo computacional como se explicara más adelante (Kharazian & Almansa, 2017).

Al analizar las estructuras sin fuerzas de choque se lo puede hacer en intervalos de tiempo (periodos de discretización) no tan pequeños. Ya que lo que buscamos en este punto es la mayor cantidad de información y realizar correcciones antes de introducir las fuerzas de colisión.

3.6.2 RESPUESTA DINÁMICA CON FUERZA DE CHOQUE.

La fuerza de colisión se obtuvo al introducir el modelo analítico seleccionado 'viscoelástico no lineal' mediante líneas de código en lenguaje de programación Python adicionales dentro de un análisis transitorio de OpenSees. La función

creada para este propósito es **Dynamic_WITH_Pounding_NIVe** disponible completa en los anexos.

En la función creada existen controladores mediante los desplazamientos relativos y velocidades relativas en cada paso del análisis transitorio, permitiendo reconocer los periodos de aproximación y restitución de la colisión, posteriormente se puede asignar las fuerzas de colisión de la cual se hablará en el Capítulo 5 de resultados.

3.6.2.1 Dynamic_WITH_Pounding (PARAMETROS DE ENTRADA)

Los parámetros de entrada de **son**:

n_contactos: Número de pisos, en la que masas colindantes entran en contacto.

l_gap: Abertura entre las estructuras.

e: Coeficiente de restitución.

zeta: Relación de amortiguamiento de impacto.

beta: Rigidez de impacto.

tasa_muestreo: Periodo de discretización.

n_pasos: Numero de pasos que va a tener el análisis Transitorio.

Fpounding: Factorizador de la fuerza de choque.

Todas las variables de entrada pueden ser números de tipo entero o de punto flotante, todas de carácter obligatorio y variable acorde con el modelo estructural y las condiciones que se esté estudiando a excepción de **Fpounding** que debe ser colocado siempre con el valor de 1.

Las variables **e**, **zeta** y **beta** para este capítulo se decidió mantenerlos constantes durante todo el evento sísmico ya que son valores que están presentes en la mayoría de los modelos analíticos de fuerza de colisión y este no es la excepción, están altamente relacionados con procesos experimentales, de calibración y corrección, por lo que cada uno de ellos sería objeto de un estudio completo.

3.6.2.2 **Fpounding** y periodos de discretización

Los periodos de discretización o intervalos de tiempo tienen que ser muy pequeños al analizar colisiones, ya que al suceder en periodos de tiempo muy cortos que generan grandes fuerzas súbitamente pueden ocasionar problemas de convergencia en OpenSees y no se encuentren soluciones numéricas sin importar el método numérico que se utilice.

Fpounding en primera instancia fue pensado para evitar el problema de convergencia cuando se usan periodos de discretización que no sean lo suficientemente pequeños, debido a que permite dividir la fuerza de colisión en una fracción del valor calculado. Lo que significa si decide modificar **Fpounding** a 10, se introduce únicamente la décima parte de la fuerza de colisión.

Por lo tanto, cuando el periodo de discretización es lo suficientemente pequeño de tal manera que no existan problemas de convergencia **Fpounding** debe ser siempre igual a 1 que equivale a la fuerza de colisión calculada, a menos que se justifique su fraccionamiento a causa de alguna solución que provea amortiguamiento en la zona de colisión.

3.6.2.3 **Dynamic_WITH_Pounding_NIVe (PARAMETROS DE SALIDA).**

Con el objetivo de proveer la mayor cantidad de información de las colisiones y evitar subjetividades se generó una serie de parámetros de salida que son:

F_energy_loss_only: Energía Perdida en cada colisión por separado.

F_Nchoques_i: Número de colisiones durante el evento sísmico en cada piso.

F_dur: Duración que tiene cada colisión.

F_ts: Tiempo inicial y final de cada colisión.

Fgap_dif_i: Incremento de fuerza de colisión, $F_{gap}(i+1) - F_{gap}(i)$.

Fgap_i: Fuerzas de colisión de todo el evento sísmico de cada piso.

Fgap_maxs: Fuerza máxima de cada colisión.

Fgap_only: Fuerzas de colisión por separado.

3.7 SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD (SDOF).

Los análisis más básicos son llevados a cabo usando modelos de masas concentradas de un grado de libertad dinámico (SDOF) mediante la ecuación 3.7. (Jankowski & Mahmoud, 2015).

La respuesta estructural bajo excitación sísmica en la base, será medida principalmente en los desplazamientos y velocidades en cada instante de tiempo de los nodos colindantes donde se concentró la masa (ver Figura 3.6), m_1 y m_2 son las masas concentradas de todo el piso. Los desplazamientos y velocidades son la información imprescindible para poder utilizar cualquiera de los modelos de fuerza de colisión.

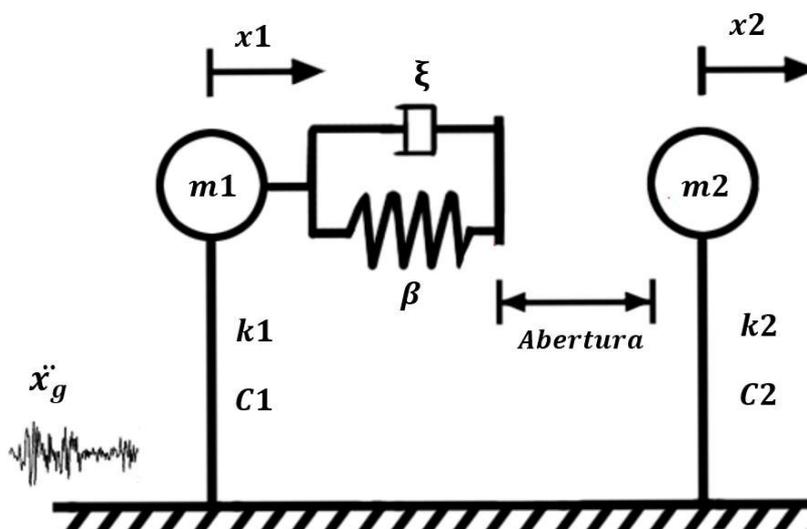


Figura 3.6: Modelo de masas concentradas con un grado de libertad dinámico (SDOF), con modelo de fuerza de colisión Viscoelástico no lineal.

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Que expresada matricialmente resulta.

$$[M][\ddot{x}(t)] + [C][\dot{x}(t)] + [F_s(t)] + [F(t)] = -[M][1][\ddot{x}_g(t)] \quad (3.7)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1(t) \\ \ddot{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & 0 \\ 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F(t) \\ -F(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ \ddot{x}_g(t) \end{bmatrix}$$

3.7.1 CASO 1: JANKOWSKY 2010 SDOF

Es un estudio experimental y numérico realizado a escala reducida de torres con elementos vigas, columnas y diagonales hechas en acero, y donde el material de la losa fue variando con distintos materiales como hormigón, acero, madera y cerámica (ver Figura 3.7 (a), (b)). Para el presente trabajo únicamente se considera la variación en acero, todos elementos son tipo 18G2A (Jankowski, 2010).

La estructura más ligera y flexible se encuentra en el lado izquierdo y la más pesada y rígida al lado derecho (ver Figura 3.8 (a), (c)). Las propiedades que ocasionan lo mencionado están detallados en las (Tablas 3.3; 3.4 & 3.5).

Las diferencias entre los resultados experimentales y numéricos fueron calculadas por el error cuadrático medio (RMSE) (ver ecuación 3.8) que mide el error existente entre dos conjuntos de datos, comparando así el valor predicho con el valor observado en experimentación (Jankowski & Mahmoud, 2015).

$$E = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{NV} (H_i - \bar{H}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{NV} H_i^2}} * 100\% \quad (3.8)$$

Donde:

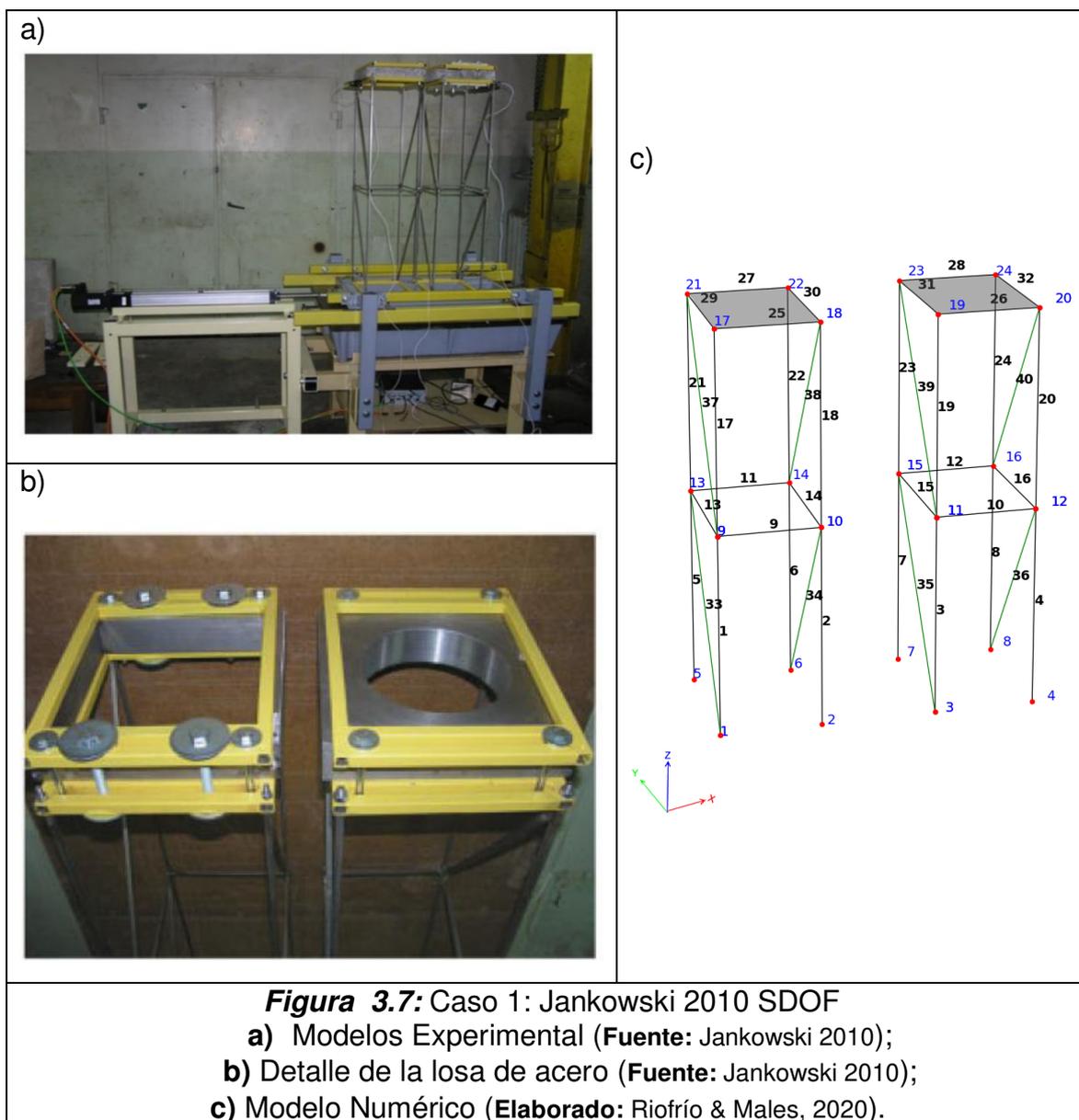
NV = Número de valores dentro del análisis tiempo historia.

H_i = Desplazamientos nodales obtenidos de la experimentación.

\bar{H}_i = Desplazamientos nodales obtenidos del análisis numérico.

Así pues, se determinó que para el caso de modelos con losa de acero en el pico máximo de desplazamiento existe una variación de 4.9 % y al calcular todos los errores de desplazamientos nodales para un sismo y sumarlos, el modelo de fuerza de colisión en el que se tuvo menos error (RMSE) es el modelo viscoelástico no lineal con 22.6% de error, mientras que los otros modelos se obtuvo mayor porcentaje de error, debido a la gran sensibilidad que tiene el golpeteo a pequeños cambios que serán discutidos más adelante además simplificaciones como el considerar el coeficiente de restitución constante en todo el evento sísmico, es así

que al calcularlo variable para cada colisión se logra reducir de error (RMSE) de 22.6% a 20.5%. (Jankowski & Mahmoud, 2015).



3.7.1.1 Definición geométrica de las estructuras

La configuración geométrica esta descrita en (Jankowski, 2010), y esta resumida en la (Tabla 3.3.), adicionalmente se consideró una separación entre las estructuras de 4 [cm].

Tabla 3.3:
Propiedades geométricas Caso 1

	EJE X [m]		EJE Y [m]		EJE Z [m]	
Torre 1	x ₁	0.22	y ₁	0.3	z ₁	0.5
					z ₂	0.5
Torre 2	x ₁	0.22	y ₁	0.3	z ₁	0.5
					z ₂	0.5

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.7.1.2 Propiedades mecánicas de materiales

Todo material dentro del modelo numérico fue considerado como acero 18G2A (ver Tabla 3.4).

Tabla 3.4:
Propiedades mecánicas de los materiales Caso 1

	Módulo de Young [N/m ²]		Módulo de Poisson [-]		Peso por unidad de volumen [N/m ³]	
Torre 1	E-t1	2.1 e 11	u-t1	0.3	8-t1	78500
Torre 2	E-t2	2.1 e 11	u-t2	0.3	8-t2	78500

NOTA: El peso por unidad de volumen se asume un valor similar al acero comercial A36

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Los elementos vigas, columnas y diagonales son secciones rectangulares (ver Tabla 3.5.) que están compuestos por un mallado de secciones fibra, con una discretización en la que resultan 25 fibras, 5 subdivisiones en cada sentido de la sección transversal. Se debe recalcar que las secciones tuvieron que ser modificadas ya que, con las indicadas en la investigación no suceden choques en el modelo numérico.

Tabla 3.5:
Propiedades de las secciones de las estructuras Caso 1

SECCIONES DE LAS TORRES					
	Columnas				
Torre 1	bt-1	0.005699	A	3.247E-05	[m ²]
			I _y	8.790 E-11	[m ⁴]
	ht-1	0.005699	I _z	8.790E-11	[m ⁴]
			G	8,076E10	[Kg/m]
	bt-2	0.0082	A	6.724E-05	[m ²]
			I _y	3.767E-10	[m ⁴]

Torre 2			I _z	3.767E-10	[m ⁴]
	ht-2	0.0082	G	8,076E10	[Kg/m]

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.7.1.3 Propiedades dinámicas

Algunas de las propiedades primordiales y relevantes para la respuesta dinámica de la estructura son tabuladas (ver Tabla 3.6). y como se vio en la necesidad de modificar las secciones esto implica una modificación de la rigidez lateral, entonces se muestra también variación en la frecuencia obtenida.

Tabla 3.6:

Propiedades dinámicas de las torres caso 1

	Secciones [m]		Masas [kg]		Amortiguamientos [-]		Frecuencias [Hz]	
Torre 1	bt-1	0.005699	mt1	9.485	ξ _{t1}	0.004	f1	2.659
	ht-1	0.005699						
Torre 2	bt-2	0.0082	mt2	18.34	ξ _{t2}	0.01	f2	3.954
	ht-2	0.0082						

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.7.1.4 Análisis dinámico sin fuerzas de colisión caso 1.

Para el caso 1 las estructuras están sometidas a aceleración en la base del sismo del Centro y es analizado 40 segundos del evento (ver Figura 3.8), sin embargo, se puede reducir el tiempo de análisis a una ventana por ejemplo de 10 seg (como se lo hará más adelante para el caso 3), para ello se puede utilizar las variables **T_discretizacion** y **n_pasos** para controlar en qué punto termina.

De forma ilustrativa para generar la ventana temporal se realiza el siguiente calculo.

$$T_{\text{discretizacion}}=0.0001$$

$$n_{\text{pasos}}=100000$$

$$T_{\text{discretizacion}}*n_{\text{pasos}}=10 \text{ seg} \quad (3.9)$$

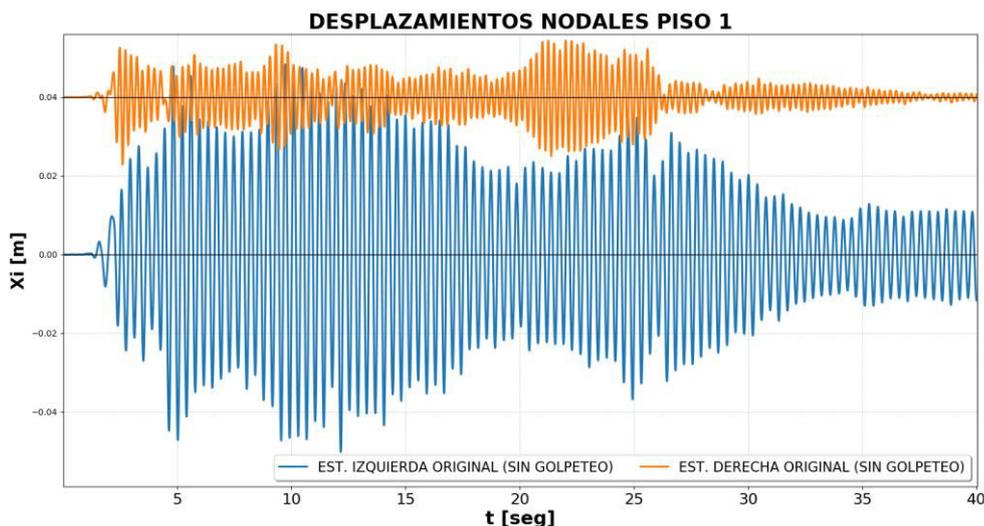


Figura 3.8: Respuesta dinámica sin fuerza de colisión
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.7.1.5 Propiedades de colisión

Las propiedades necesarias para el modelo visco elástico están resumidas en la siguiente tabla:

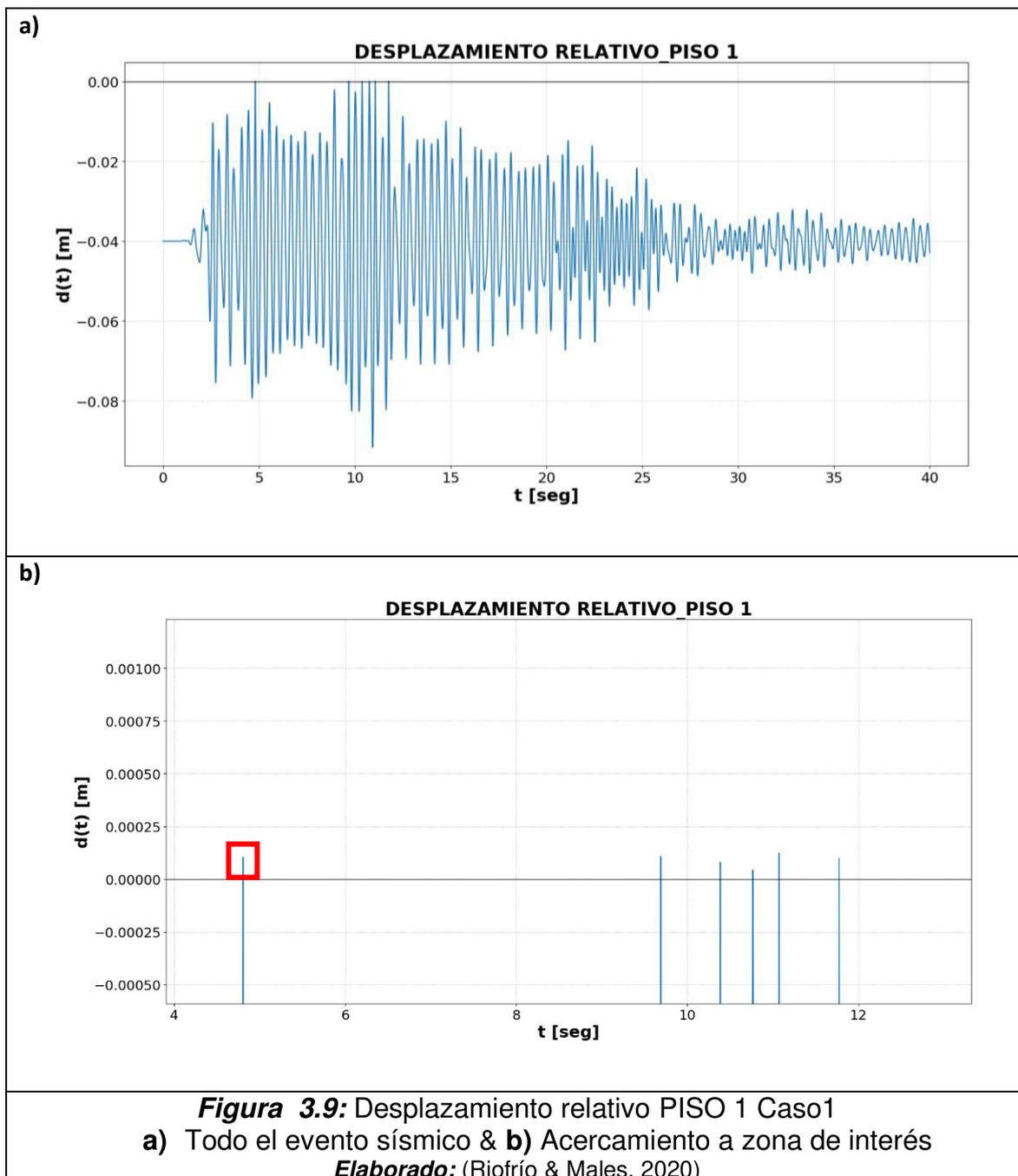
Tabla 3.7:
 Propiedades de colisión caso 1

N_contactos	1	[-]
l_gap	0.04	[m]
e	0.68	[-]
zeta	0.31	[-]
beta	8.32E+09	[N/m ^{3/2}]
Fpounding	1	[-]

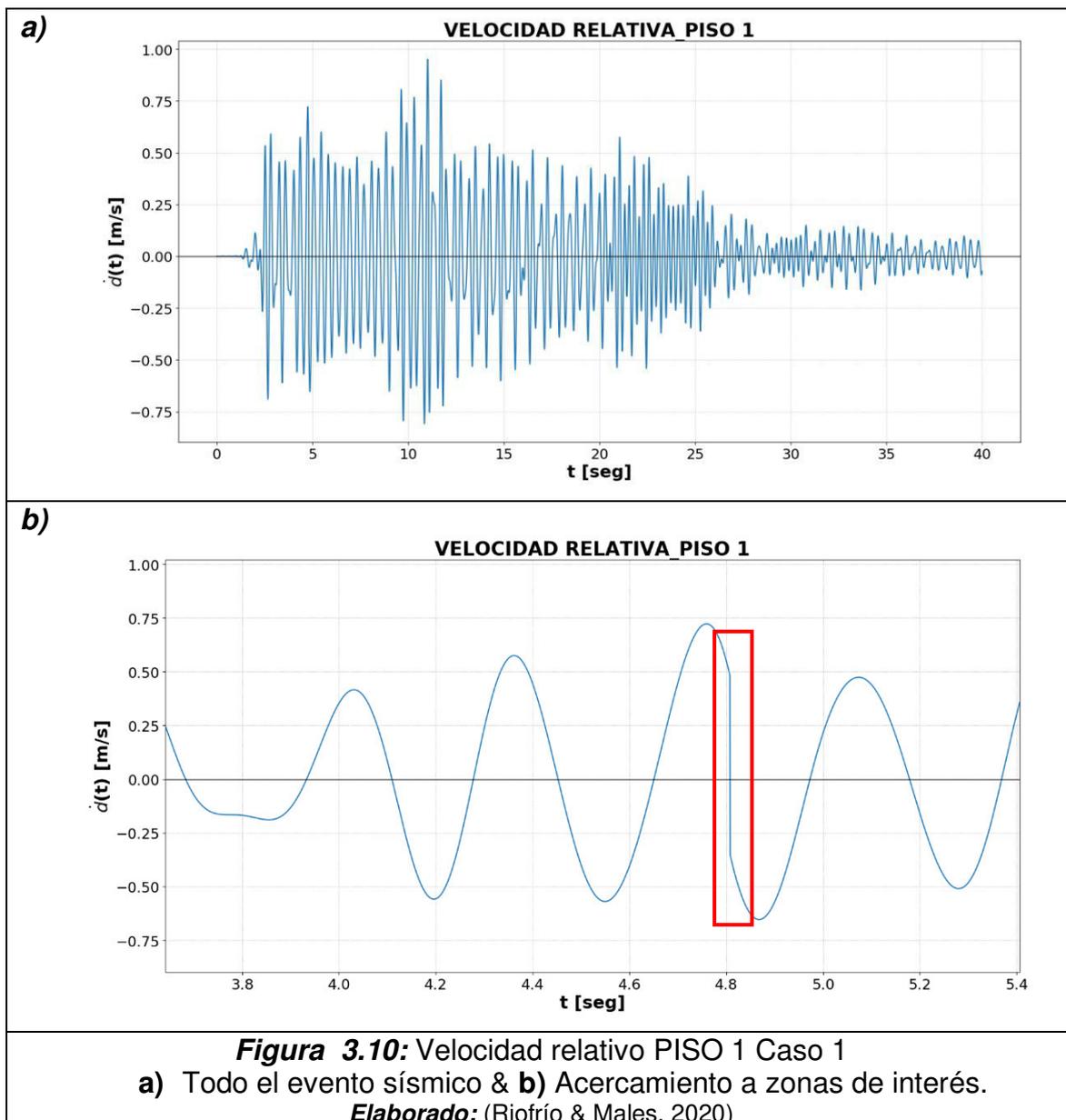
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.7.1.6 Desplazamiento y velocidad relativa caso 1

La (Figura 3.9) muestra los desplazamientos relativos acorde con las ecuaciones 3.1 en los lugares donde se asignará las fuerzas de colisión. La manera en la que se asigna las fuerzas en cada paso ocasiona que los desplazamientos relativos estén bastante restringidos y que sucedan en intervalos muy cortos de tiempo (ver Figura 3.10).



La (Figura 3.10 a) muestra las velocidades relativas acorde con las ecuaciones 3.2, se observa que existe cambios súbitos de velocidad en los lugares donde existen los desplazamientos relativos (ver Figura 3.10), además se observa que existen velocidades cero que corresponde con el valor máximo de desplazamiento relativo.



3.8 SISTEMA DE VARIOS GRADOS DE LIBERTAD (MDOF)

Modelos más detallados pueden ser llevados a cabo análisis más complejos mediante modelos de varios grados de libertad (MDOF) (ver Figura 3.11) asumiendo comportamiento elástico o inelástico. (Jankowski & Mahmoud, 2015).

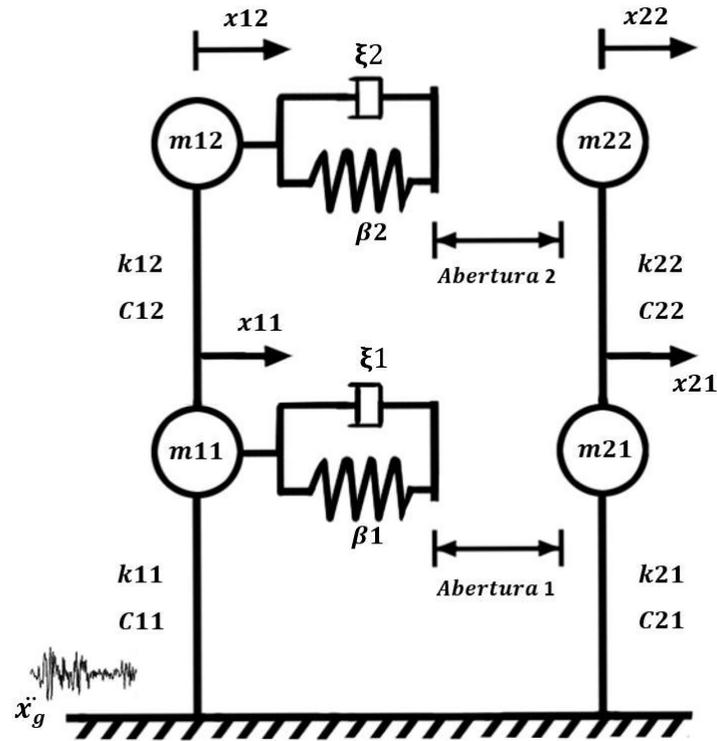


Figura 3.11: Modelo de masas concentradas con varios grados de libertad dinámicos (MDOF), con modelo de fuerza de colisión Viscoelástico no lineal.

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Partiendo nuevamente de la ecuación 3.7 se generaliza para varios grados de libertad.

$$\begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_{11}(t) \\ \ddot{x}_{12}(t) \\ \ddot{x}_{21}(t) \\ \ddot{x}_{22}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} + C_{12} & -C_{12} & 0 & 0 \\ -C_{12} & C_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{21} + C_{22} & -C_{22} \\ 0 & 0 & -C_{22} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{11}(t) \\ \dot{x}_{12}(t) \\ \dot{x}_{21}(t) \\ \dot{x}_{22}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{11} + K_{12} & -K_{12} & 0 & 0 \\ -K_{12} & K_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{21} + K_{22} & -K_{22} \\ 0 & 0 & -K_{22} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{11}(t) \\ x_{12}(t) \\ x_{21}(t) \\ x_{22}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ -F_1(t) \\ -F_2(t) \end{bmatrix} = \\ - \begin{bmatrix} m_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{21} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_g(t) \\ \ddot{x}_g(t) \\ \ddot{x}_g(t) \\ \ddot{x}_g(t) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

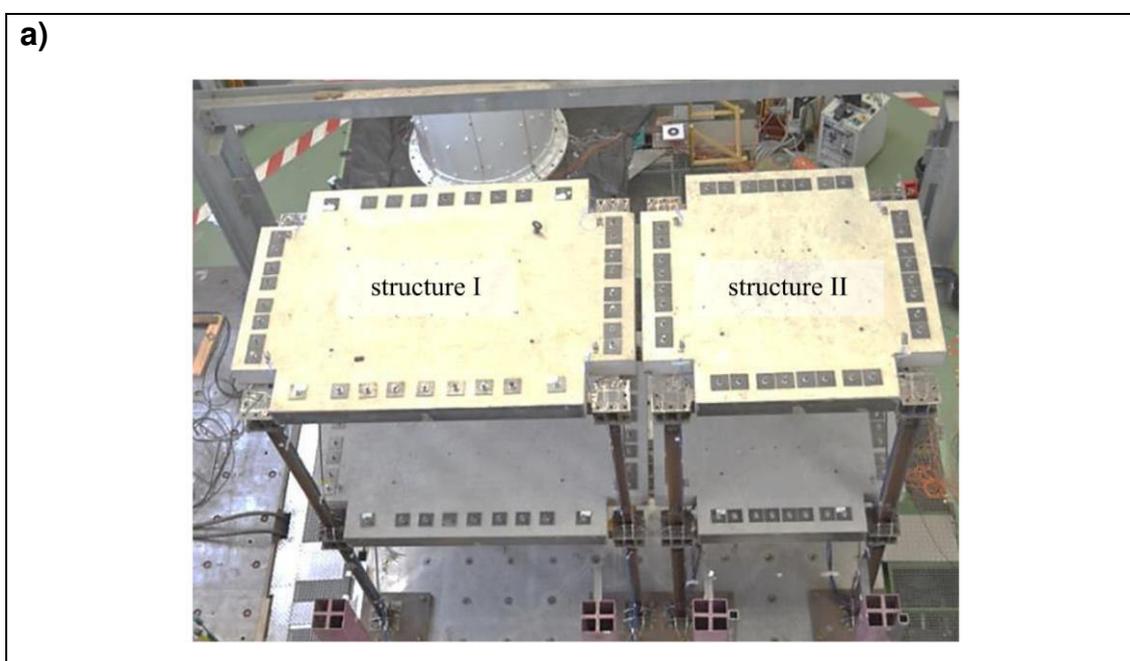
La ecuación 3.10 es válida mientras la estructura se mantenga en el rango elástico. Para análisis no lineales se puede considerar la no linealidad del material y la no linealidad geométrica que ocasiona la degradación de la rigidez y del amortiguamiento.

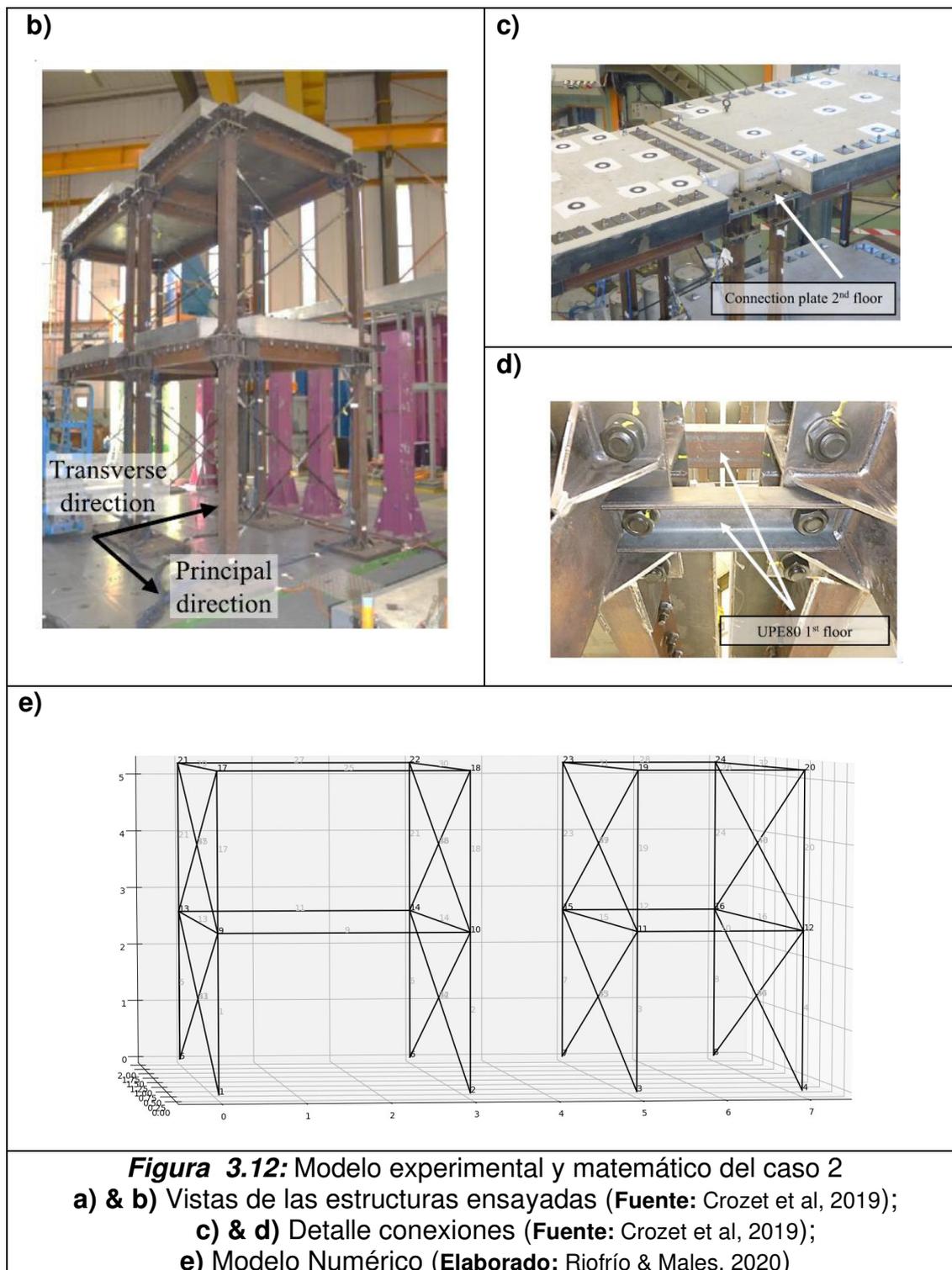
3.8.1. CASO 2. IGUAL NÚMERO DE PISOS

En este subcapítulo se presenta el estudio experimental y numérico de (Crozet et al, 2019) realizado a escala real de estructuras porticadas con elementos vigas y columnas en estructura metálica, diagonales cables de acero y losas de concreto sin reforzar asentada sobre una placa de acero, (ver Figura 3.12 a, b). Las conexiones fueron diseñadas para que se comporte como nudo rígido, se han realizado pruebas para intensidades de excitación bajas a moderadas, que no inducen ceder en los marcos de acero, así como para alta intensidad de excitación donde se observó daños, especialmente en las bases de las columnas. La etapa experimental terminó cuando aparecieron grietas en la base de las columnas de la estructura más flexible (Crozet et al, 2019).

La estructura más flexible se encuentra en el lado izquierdo y la más rígida al lado derecho (ver Figura 3.12. e). Las propiedades que ocasionan lo mencionado están detallados en las (Tablas 3.8; 3.9; 3.10 & 3.11).

El estudio llevado por Crozet se centra en determinar las aceleraciones, pseudo espectros de respuesta, derivas y el efecto que genera las fuerzas de colisión con distintos escenarios de separación entre las estructuras y la intensidad de sismos, sin embargo, no muestra un registro de las fuerzas de colisión en cantidad ni magnitud, tampoco los bucles de histéresis (energía disipada).





3.8.1.1 Definición geométrica de las estructuras

Al ser estructuras de configuración en planta simples únicamente se muestran los valores aproximados (ver Tabla 3.8.) acorde con la mesa vibratoria de Azalee

tomado de otras investigaciones hechas en el mismo laboratorio de la Universidad de Saclay Paris (Varpasou & Lahtinen, 2015).

Tabla 3.8:

Propiedades geométricas de cada estructura Caso 2

	EJE X		EJE Y		EJE Z	
		[m]		[m]		[m]
Torre 1	x1	3.0	y1	2.0	z1	2.6
					z2	2.6
Torre 2	x2	2.0	y2	2.0	z1	2.6
					z2	2.6

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.8.1.2 Propiedades mecánicas de materiales

Los elementos de acero estructural como vigas y columnas son hechos de acero grado S355 para la estructura izquierda (Torre 1) y grado S275 para la estructura de la derecha (Torre 2) (Crozet et al, 2019).

Sin embargo, por la gran variabilidad que pueden llegar a existir incluso por la composición química del acero y ya que no hay mayor detallamiento en la descripción de la experimentación se decidió como primer acercamiento utilizar los parámetros que existen en ejemplos utilizados en el manual de OpenSees (ver Tabla 3.9.) (Mazzoni et al., 2006).

Tabla 3.9:

Propiedades mecánicas de los materiales caso 2.

	Módulo de Young		Módulo de Poisson		Peso por unidad de volumen	
		[N/m ²]		[-]		[N/m ³]
Torre 1	E-t1	2.0 e 11	u-t1	0.3	8-t1	78500
Torre 2	E-t2	2.0 e 11	u-t2	0.3	8-t2	78500

NOTA: El peso por unidad de volumen se asume un valor similar al acero comercial A36

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.8.1.3 Definición de secciones

Los elementos vigas y columnas por perfiles W (ver Tabla 3.10) que para el modelo computacional se asignó un mallado de secciones fibra, con una discretización en la que resultan 40 fibras (ver Figura 3.13). Sin considerar el área equivalente por las curvas de las esquinas ya que para los objetivos del presente

trabajo no son relevantes. La discretización está en concordancia con uno de los experimentos computacionales realizados en (Jerves, 2018).

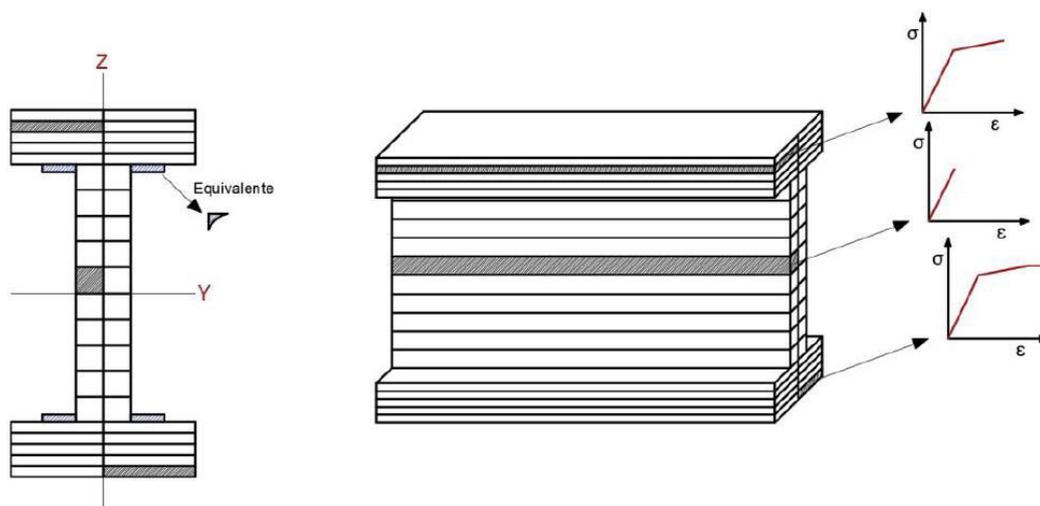


Figura 3.13: Mallado de la sección transversal de vigas y columnas.
Fuente: (Jerves, 2018).

Tabla 3.10:

Propiedades de las secciones de las estructuras caso 2.

SECCIONES DE LAS TORRES				
		Columnas		
Torre 1	HE100AA	A	1.56E-03	[m ²]
		I _y	2.37E-06	[m ⁴]
		I _z	9.21E-07	[m ⁴]
		I _t	2.51E-08	[m ⁴]
		G	12.2	[Kg/m]
Torre 2	HE140AA	A	2.30E-03	[m ²]
		I _y	7.20E-06	[m ⁴]
		I _z	2.75E-06	[m ⁴]
		I _t	3.54E-08	[m ⁴]
		G	18.1	[Kg/m]
Torre 1 y 2	Vigas			
	IPEA200	A	2.35E-03	[m ²]
		I _y	1.59E-05	[m ⁴]
		I _z	1.17E-06	[m ⁴]
		I _t	4.11E-08	[m ⁴]
		G	18.4	[Kg/m]
	Cables			
	D	0.016	[m]	

Elaborado: (Riolfrio & Males, 2020)

3.8.1.4 Propiedades dinámicas

Algunas de las propiedades primordiales y relevantes para la respuesta dinámica de la estructura son tabuladas (ver Tabla 3.11).

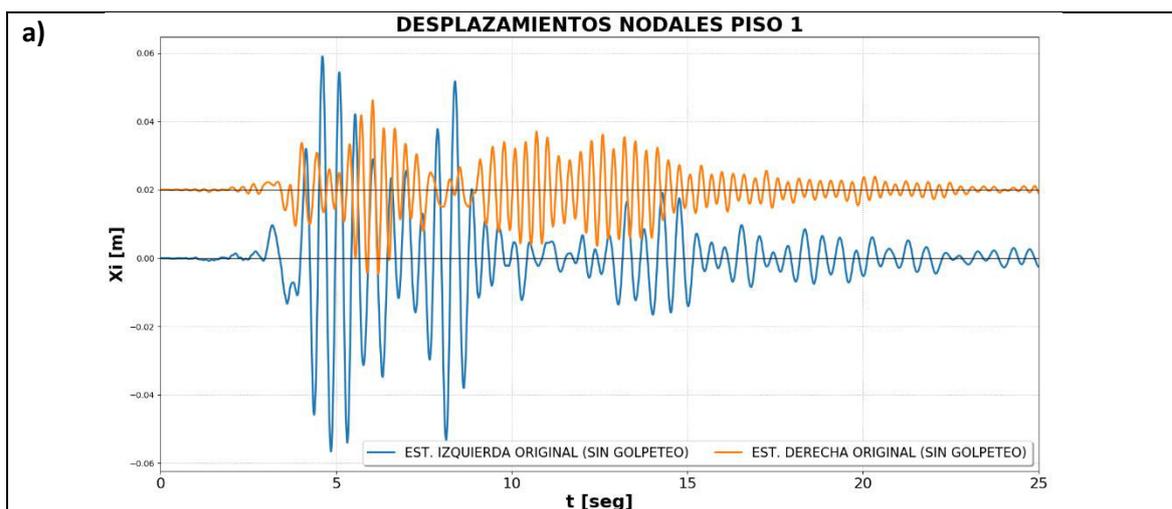
Tabla 3.11:
Propiedades dinámicas de las torres caso 2.

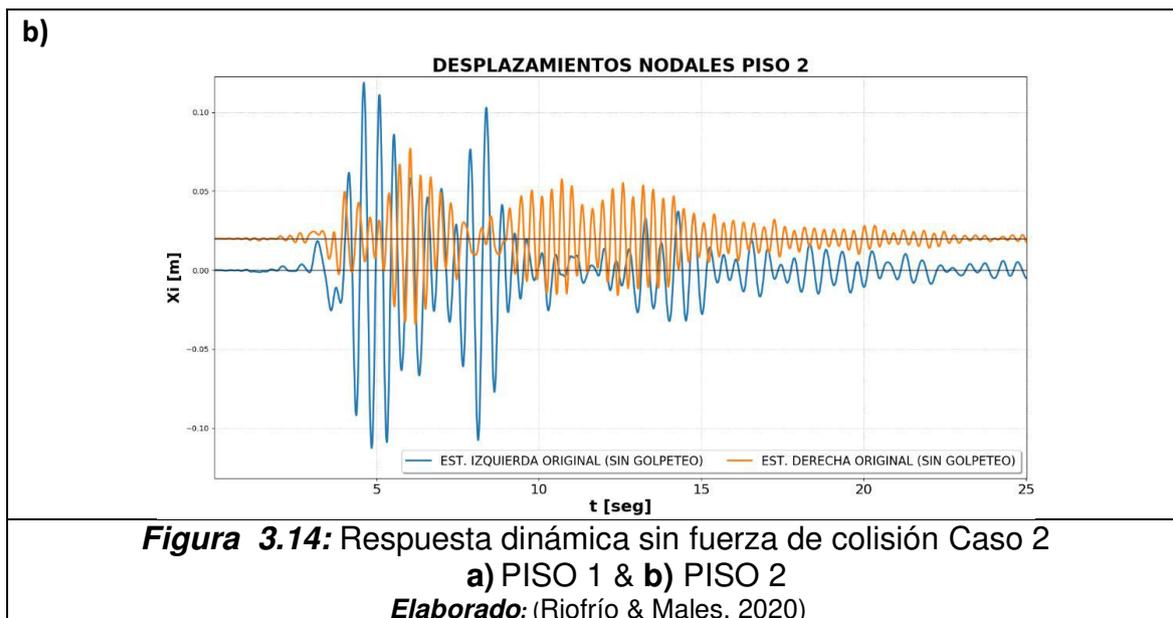
	Masas		Amortiguamientos		Frecuencias	
		[kg]		[-]		[Hz]
Torre 1	m _{t t1_1}	480.30592	ξ_{t1}	0.02	f ₁	2.05
	m _{t t1_2}	460.20592			f ₂	6.46
Torre 2	m _{t t2_1}	430.30592	ξ_{t2}	0.02	f ₁	3.20
	m _{t t2_2}	410.20592			f ₂	6.86

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.9.1.5 Análisis dinámica sin fuerza de colisión caso 2

Para el caso 2 las estructuras están sometidas a aceleraciones en la base del sismo del Northridge que generan máximos desplazamientos y superposición en las representaciones graficas de desplazamientos nodales de los pisos 1 y 2 (ver Figura 3.14 a y b).





3.8.1.6 Propiedades de colisión

Las propiedades necesarias para el modelo viscoelástico no lineal están resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 3.12:

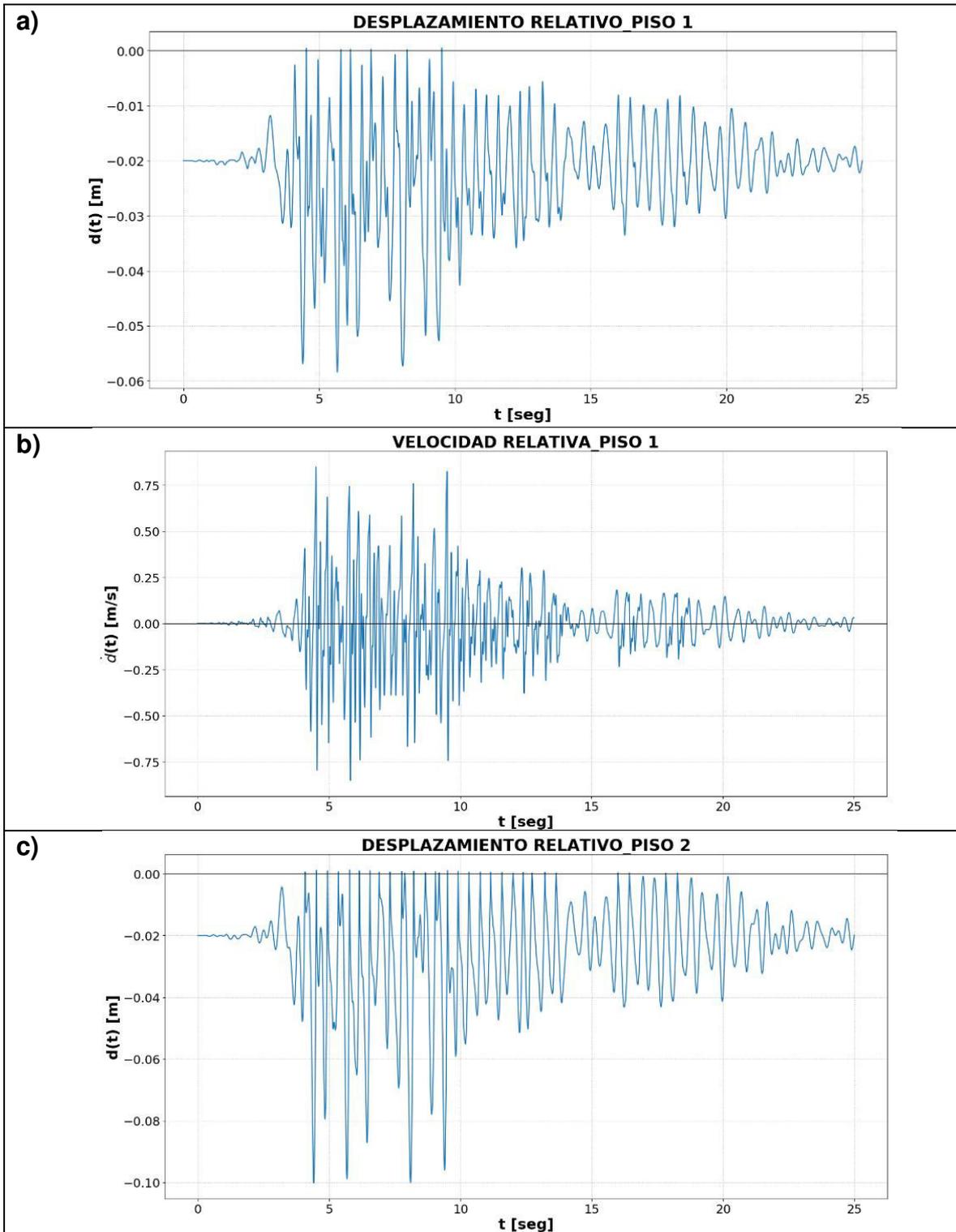
Propiedades de colisión Caso 1

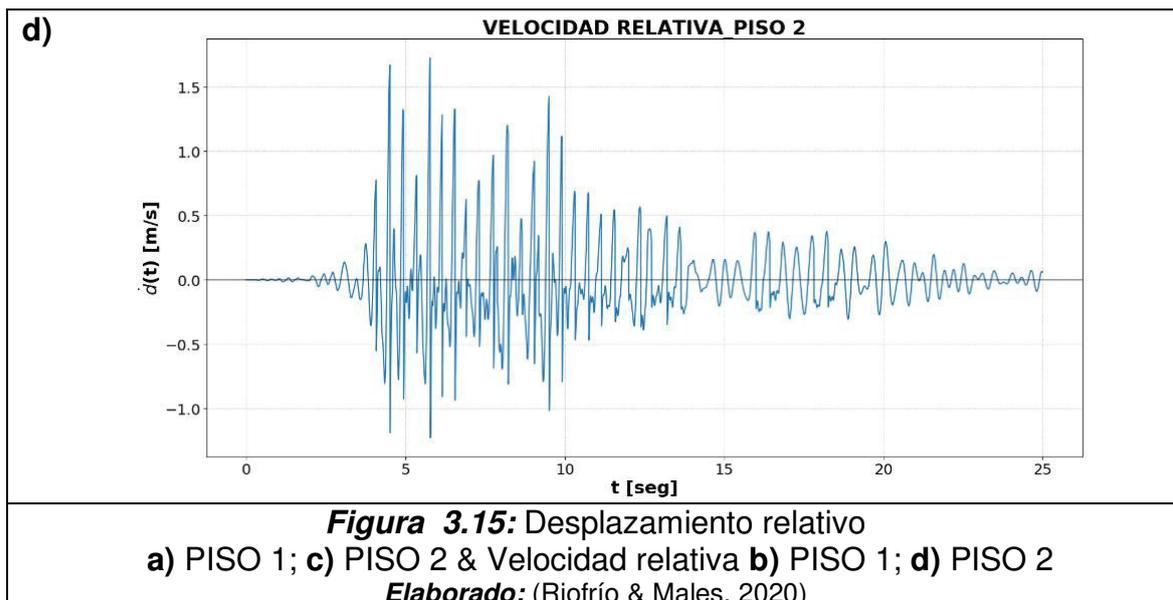
N_contactos	2	[-]
l_gap	0.02	[m]
e	0.68	[-]
zeta	0.31	[-]
beta	8.32E+09	[N/m ^{3/2}]
Fpounding	1	[-]

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.8.1.7 Velocidades y desplazamientos relativos

Las velocidades y desplazamientos relativos para el caso 2 se muestran en las siguientes figuras:





3.8.2 CASO 3. DIFERENTE NÚMERO DE PISOS

Es un estudio experimental y numérico realizado a escala 1/8 (ver Figura 3.16 a) donde las torres de acero fueron diseñadas por el método estático del código nacional de construcción de Canadá, en la que las conexiones atornilladas fueron especialmente diseñadas para que permanezcan en el rango elástica, y los elementos vigas y columnas están atornilladas a estas conexiones. La losa es una placa de acero de 4.8 mm de espesor que esta atornillada a lo largo de las vigas periféricas para asegurar comportamiento de diafragma rígido y la masa adicional se lo consigue añadiendo bloques de concreto a las que se las fijo a las planchas de acero mediante 2 varillas roscada de 6mm de diámetro (Filiatrault & Wagner,1995).

En la base de las columnas del primer piso se soldó y atornillo con 6 pernos una placa de dimensiones 150*150*19 mm con lo cual menciona se asegura una base rígida. Finalmente, con el objetivo de disminuir vibraciones torsionales accidentales se colocaron cables en diagonal para el sentido transversal de los pórticos y se registra que durante la experimentación no existió movimientos torsionales significativos. (Filiatrault & Wagner,1995).

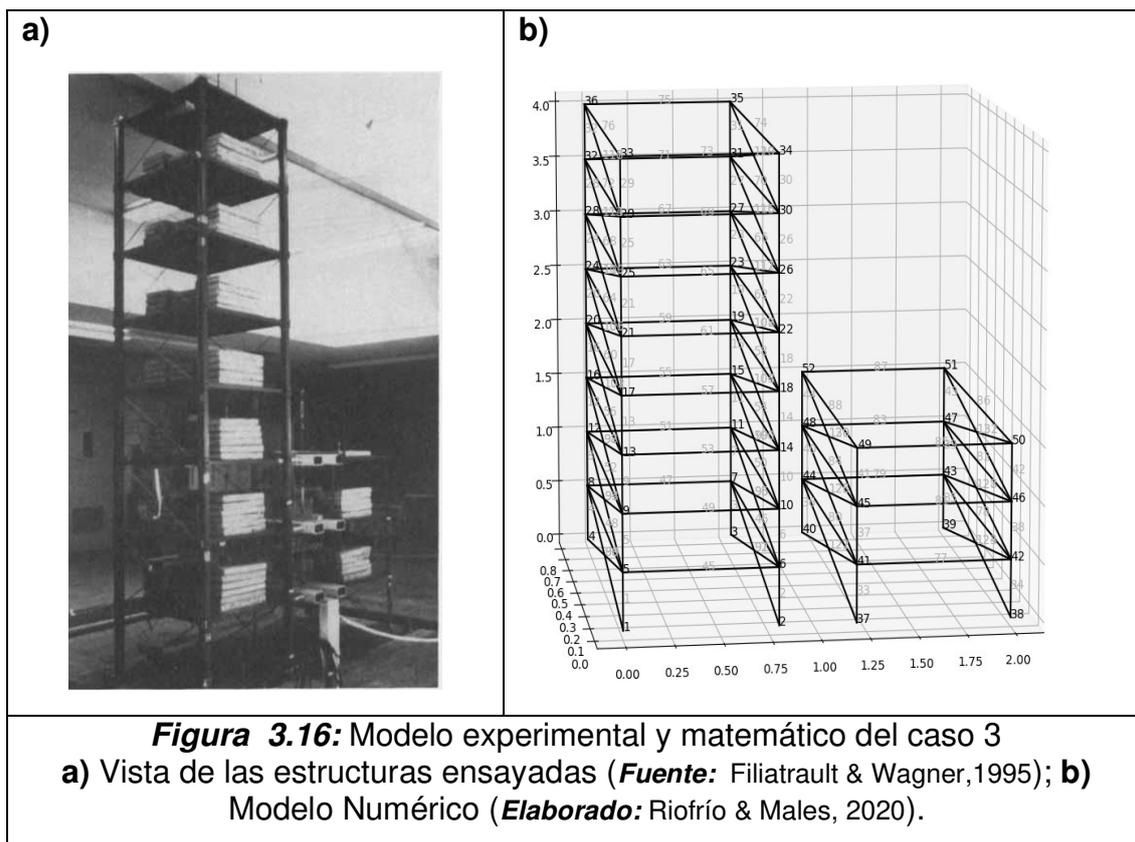


Figura 3.16: Modelo experimental y matemático del caso 3

a) Vista de las estructuras ensayadas (**Fuente:** Filiatrault & Wagner, 1995); **b)** Modelo Numérico (**Elaborado:** Riofrío & Males, 2020).

3.8.2.1 Definición geométrica de las estructuras

Las estructuras propuestas son muy regulares en planta tienen 0.8×0.8 m y en elevación de todos los pisos 0.5 m de separación (Filiatrault & Wagner, 1995).

3.8.2.2 Propiedades mecánicas de materiales

Ya que en la referencia bibliográfica no se menciona que tipo de acero fue usado se optó por asumir valores similares al acero A36; y se resume en la siguiente tabla.

Tabla 3.13:

Propiedades mecánicas de los materiales caso 3.

	Módulo de Young		Módulo de Poisson		Peso por unidad de volumen	
		[N/m ²]		[-]		[N/m ³]
Torre 1	E-t1	2.0 e 11	u-t1	0.3	γ-t1	78500
Torre 2	E-t2	2.0 e 11	u-t2	0.3	γ-t2	78500

NOTA: El peso por unidad de volumen se asume un valor similar al acero comercial A36

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.8.2.3 Definición de secciones

Las secciones elegidas para las columnas (SQUARE HSS) son secciones huecas que para el modelo computacional se asignó un mallado de secciones fibra, con una discretización en la que resultan 40 fibras, y en vigas (FLAT BAR) son secciones llenas en que resultan en 25 fibras (ver Figura 3.17). Las propiedades mecánicas que surgen de estas secciones son mostradas en la Tabla 3.14.

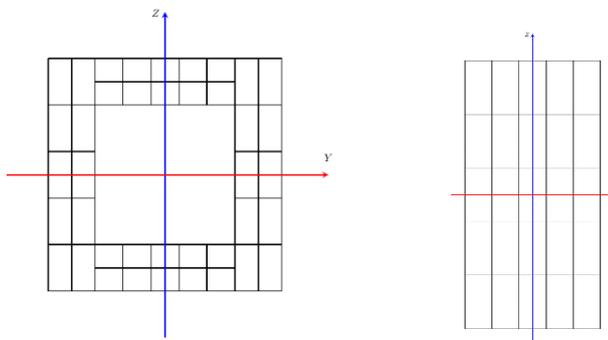


Figura 3.17: Mallado de la sección transversal de columnas y vigas.

Fuente: (Jerves, 2018).

Tabla 3.14:

Propiedades de las secciones de las estructuras caso 3.

		Columnas		
Torre 1	SQUARE HSS 50.8*50.8*3.2 mm	Ac1	6.09E-04	[m ²]
		Iy	2.28E-07	[m ⁴]
		Iz	2.28E-07	[m ⁴]
		It		[m ⁴]
		G	76923076923	[Kg/m]
Torre 2	SQUARE HSS 50.8*50.8*3.2 mm	Ac2	1.43E-04	[m ²]
		Iy	7.20E-06	[m ⁴]
		Iz	2.75E-06	[m ⁴]
		It		[m ⁴]
		G	76923076923	[Kg/m]
Torre 1 y 2	Vigas			
	FLAT BAR 12.7*25.4 mm	Av	2.35E-03	[m ²]
		Iy	1.59E-05	[m ⁴]
		Iz	1.17E-06	[m ⁴]
		It	4.11E-08	[m ⁴]
		G	18.4	[Kg/m]
	Cables			
		D	0.0125	[m]

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.8.2.4 Propiedades dinámicas

Algunas de las propiedades primordiales y relevantes para la respuesta dinámica de la estructura son tabuladas (ver Tabla 3.15).

Tabla 3.15:

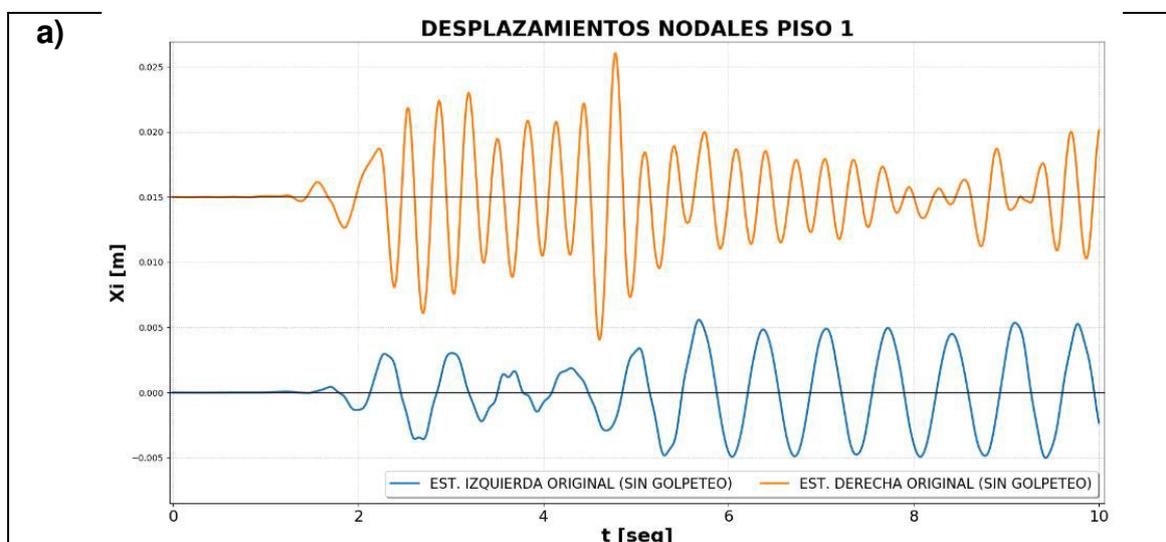
Propiedades dinámicas de las torres caso 3.

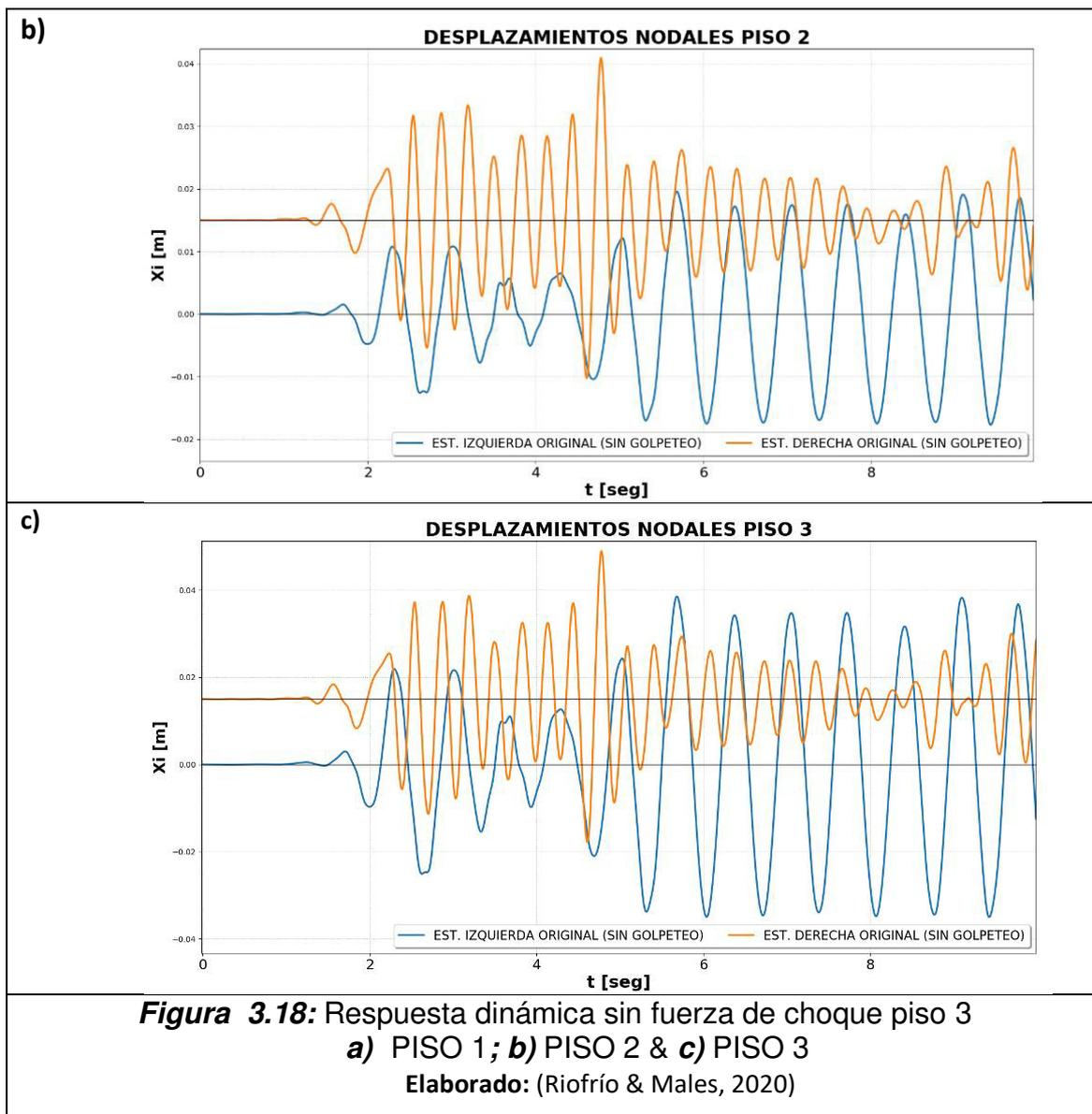
	Masas		Amortiguamientos		Frecuencias	
		[kg]		[-]		[Hz]
Torre 1	m_t_t1_1	150.866	ξ_{t1}	0.016	f_1	1.48747546
	m_t_t1_2	144.75			f_2	1.48747546
	m_t_t1_3	151.886			f_3	4.83440706
	m_t_t1_4	144.75			f_4	6.0979328
	m_t_t1_5	150.866			f_5	6.6713366
	m_t_t1_6	151.885			f_6	6.67155914
	m_t_t1_7	147.8			f_7	10.7991361
	m_t_t1_8	32.62			f_8	10.7991361
Torre 2	m_t_t2_1	145.769	ξ_{t2}	0.016	f_1	3.13087038
	m_t_t2_2	139.653			f_2	3.13087038
	m_t_t2_3	30.581			f_3	16.6666667

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.8.2.5 Respuesta dinámica sin fuerza de choque caso 3

Para el caso 3 las estructuras están sometidas a aceleraciones en la base del sismo del Centro que generan superposición en los desplazamientos nodales de los pisos 2 y 3, mientras que en el primer piso no se observa contacto (ver Figura 3.18 a, b y c).





3.8.2.6 Propiedades de colisión

Las propiedades necesarias para el modelo viscoelásticas no lineal están resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 3.16:

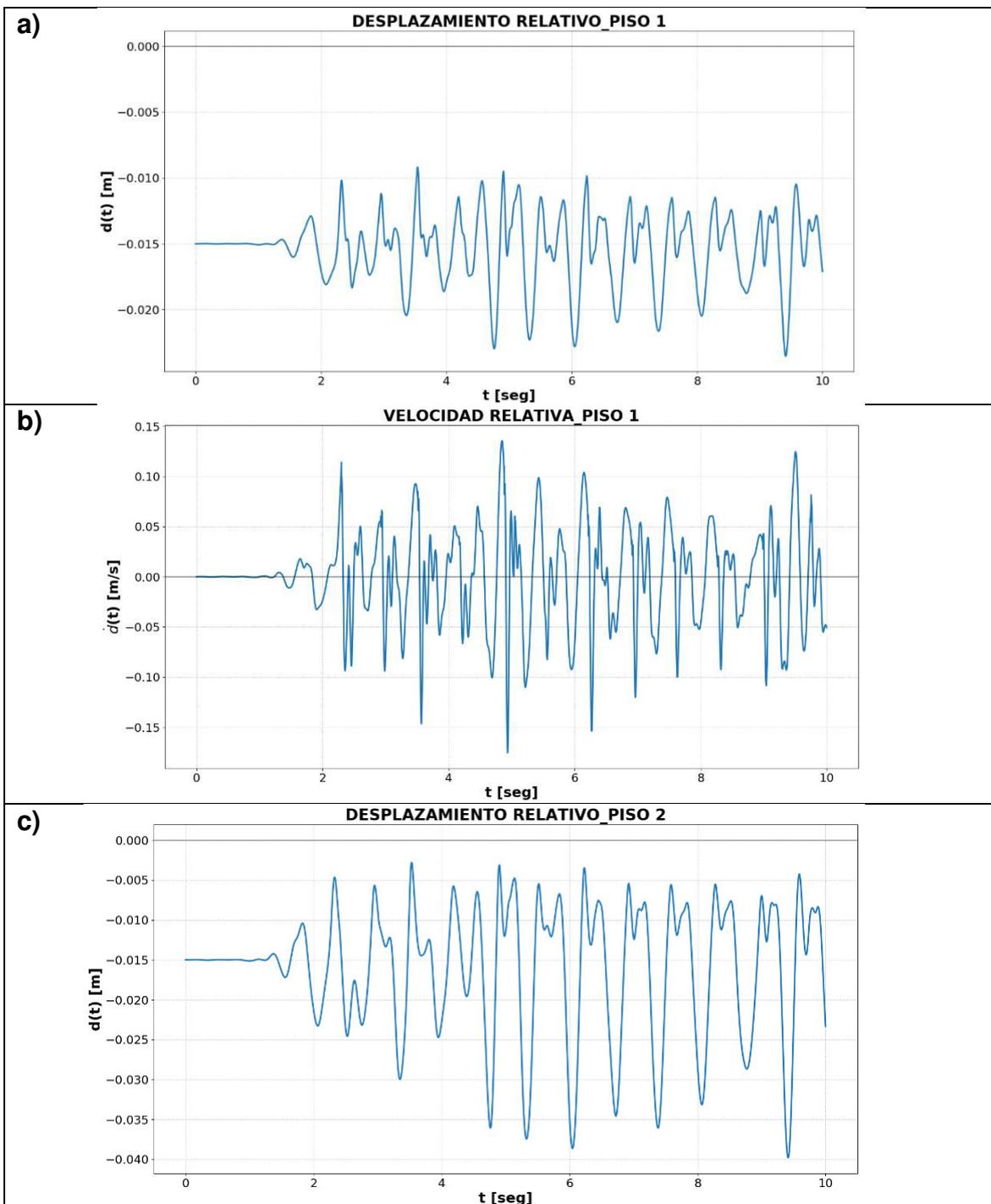
Propiedades de colisión Caso 3

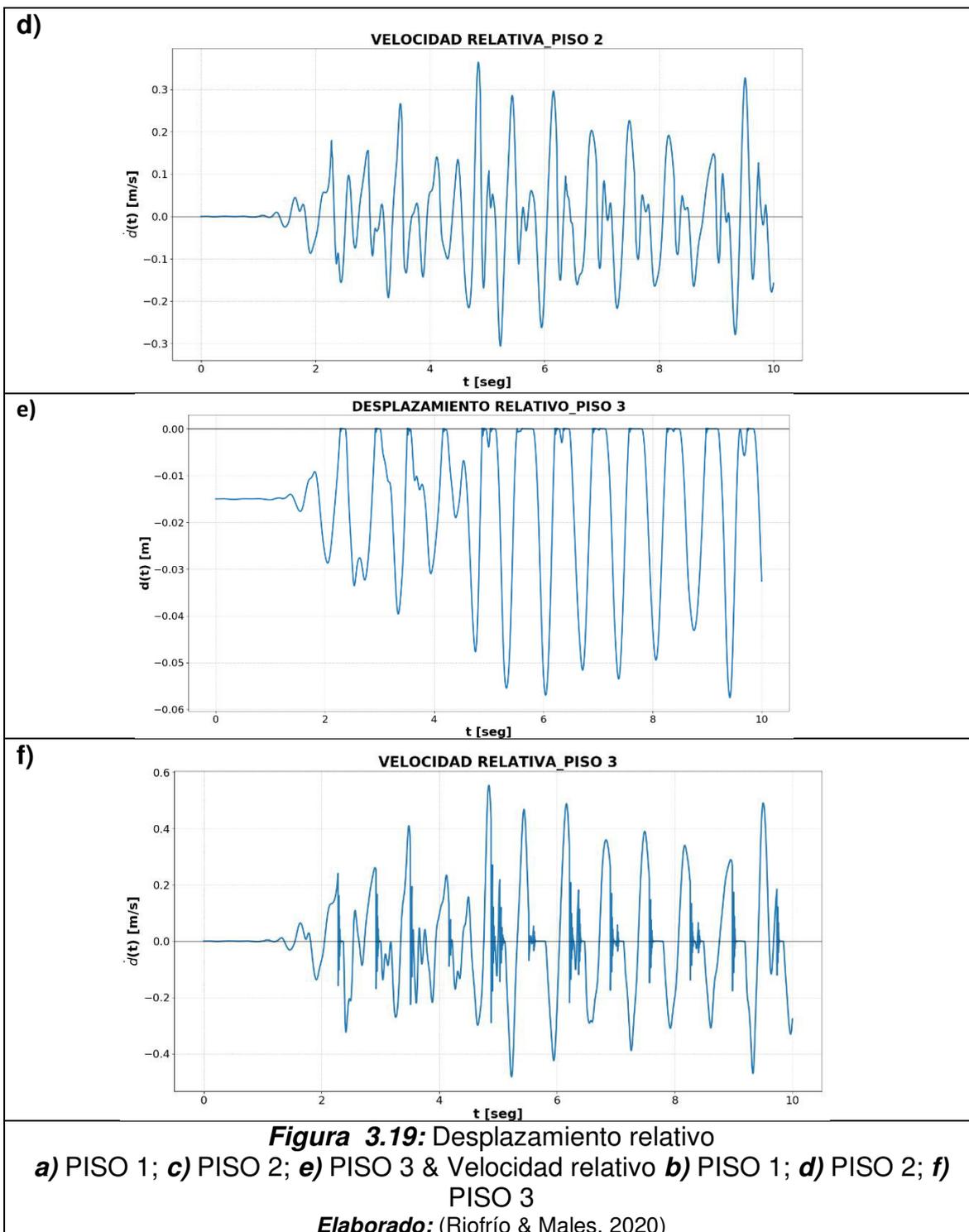
N_contactos	3	[-]
l_gap	0.015	[m]
e	0.68	[-]
zeta	0.31	[-]
beta	8.32E+09	[N/m ^{3/2}]
Fpounding	1	[-]

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

3.8.2.7 Velocidades y desplazamientos relativos caso 3

Las velocidades y desplazamientos relativos para el caso 3 se muestran en las siguientes figuras:





CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA MODELACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS EN ETABS

4.1 DESCRIPCIÓN DEL CASOS DE ESTUDIO

En el presente capítulo se realizará la simulación numérica del comportamiento de la estructura ensayada por (Jankowski,2010), tratando de reproducir las condiciones físicas de la misma. El análisis computacional tomará únicamente el caso de impacto entre elementos de acero.

Para lo cual se empleará el programa comercial ETABS, el cual posee elementos que permiten obtener las fuerzas de impacto que se generan al ocurrir el cierre de brechas. El cierre de una brecha entre diferentes partes de la estructura es un comportamiento muy común que ocurre entre estructuras adyacentes que se encuentran sometidas a sismos.

4.1.1 DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LA ESTRUCTURA

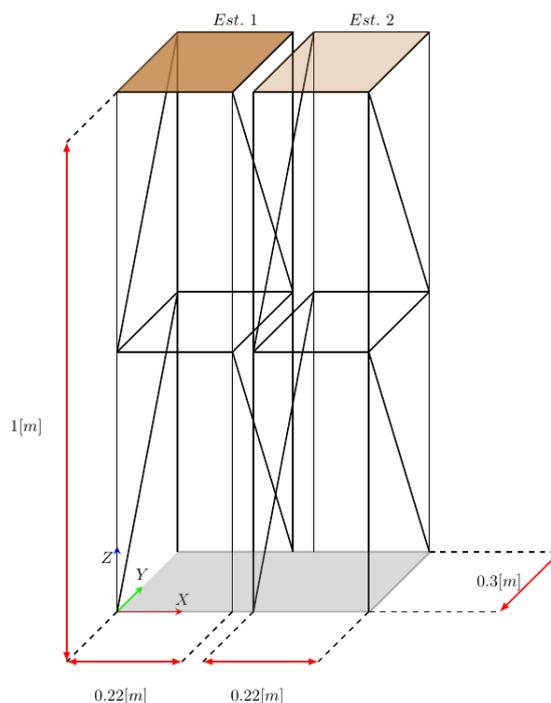


Figura 4.1: Estructuras ensayadas por (Jankowski,2010).
Elaborado: (Riofrio & Males,2020)

En la figura (4.1) se observa la configuración de las estructuras ensayadas por (Jankowski,2010), las cuales son 2 estructuras de acero de 1 [m] de altura, empotradas en su base. Separadas una distancia de 0.04[m].

4.1.2. CONSIDERACIONES DE MODELADO

Debido a la limitada información que proporcionan las fuentes, en el modelo computacional se realizaron algunas simplificaciones que permiten reproducir la estructura física mas no se está asegurando el cumplimiento de las propiedades dinámicas originales registradas en el estudio realizado por (Jankowski,2010). Para nuestros objetivos son aceptables estas simplificaciones.

Para el caso de vigas, columnas y diagonales se usaron las descritas en el capítulo 3. Ver tabla (3.6).

En el caso particular de la masa como se observa en la figura (4.2), se acoplaron en la parte superior de la estructura placas de acero las mismas que aportan una masa adicional a cada torre.

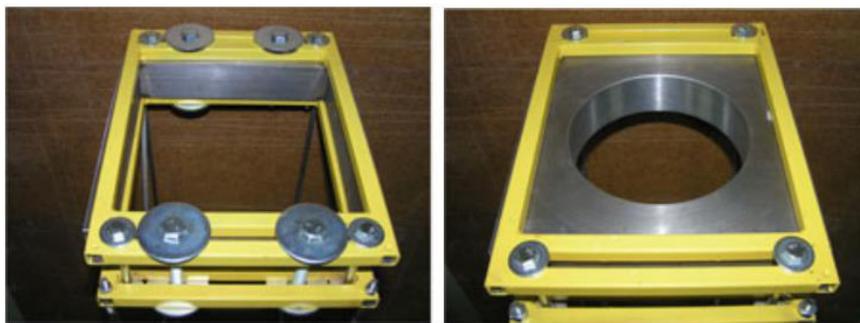


Figura 4.2: Masa adicional asignada a la estructura 1 y 2.
Fuente: (Jankowski,2010).

Estas masas adicionales en el modelo computacional han sido asignadas en el centro de masa de las estructuras al nivel de 1[m]. El valor asignado se puede ver en la tabla (4.1):

Tabla 4.1:
Masa de las estructuras

	Masas [kg]	
Torre 1	mt1	9.48
Torre 2	mt2	18.34

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

El modelo computacional generado en el programa ETABS de la estructura ensayada por (Jankowski,2010), se muestra en la figura (4.3). Esta estructura ha sido ensayada en una mesa vibratoria la cual fue sometida al acelerograma correspondiente al evento sísmico de El Centro 1940.

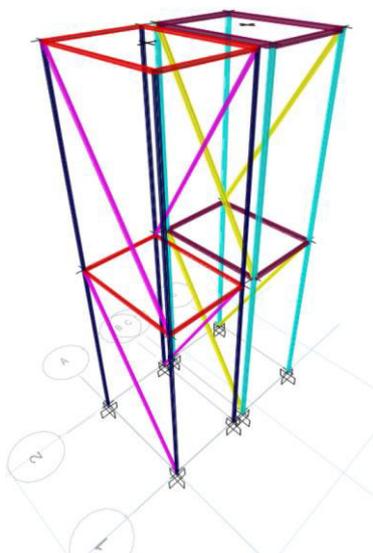


Figura 4.3: *Modelo computacional de la estructura original*

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020).

4.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO ESTRUCTURAL

4.2.1. PERIODO

Para reproducir el comportamiento dinámico de las estructuras sujetas a estudio como primer paso, se trató de igualar los periodos vibración de las estructuras ensayadas con el periodo de las estructuras modeladas. Como se puede observar en la tabla (4.2) el valor del periodo experimental y teórico de la estructura izquierda son similares. Sin embargo, el periodo de vibración experimental comparado con el valor teórico de la estructura derecha es diferente. Se ha decidido el uso de ese

periodo, ya que con los propuestos en la fuente, las estructuras no llegan a tener contacto (Jankowski,2010).

Tabla 4.2:

Calibración del modelo computacional

	Experimental	Teórico
Frecuencia		
Torre 1	<u>2.59</u>	<u>2.72</u>
Torre 2	<u>2.99</u>	<u>4.03</u>
Periodo		
Torre 1	0.39	0.37
Torre 2	0.33	0.25
Masa		
Torre 1	9.485	9.48
Torre 2	18.337	18.34

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020).

4.2.2. ELEMENTO GAP

Incorporar el elemento gap requiere definir algunos parámetros que permitirán al programa ETABS generar las fuerzas de colisión, las misma que están directamente en función de la abertura, rigidez y restricciones en los grados de libertad del elemento gap.

La selección de estos parámetros debe ser físicamente realista. En especial el valor de la rigidez k_{gap} . Ya que la convergencia numérica del elemento “gap” puede presentar problemas numéricos en la fase de solución si se emplea un término grande de rigidez. El valor seleccionado debe permitir al elemento “gap” transferir las fuerzas de compresión con un mínimo de deformación en el mismo.(Wilson, 1995)

En la figura (4.4) se puede observar la representación del elemento gap en el programa ETABS.

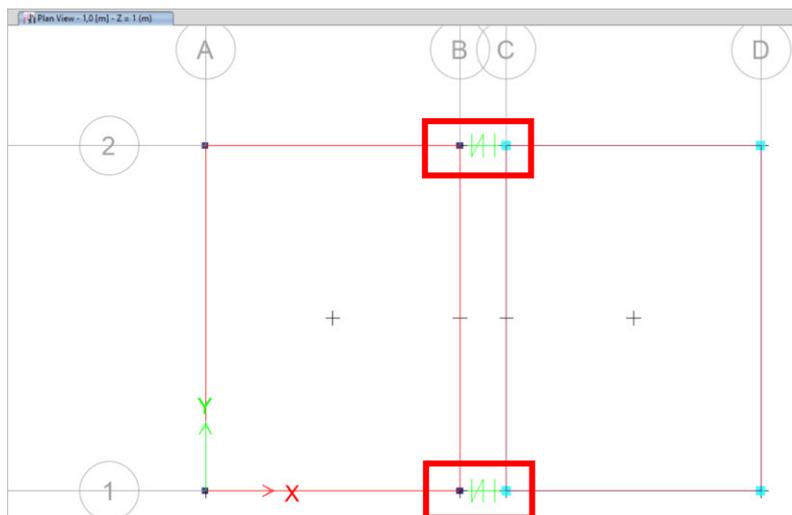


Figura 4.4: Representación gráfica del elemento gap en ETABS
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020).

4.2.2.1 Abertura

El comportamiento del elemento gap depende del valor d_0 de apertura que se asigne, a continuación, se explica cuál es la función de la apertura inicial:

1. El elemento no puede desarrollar una fuerza hasta que se cierre la apertura d_0 . Un valor negativo de d_0 indica una fuerza inicial de compresión. (Wilson, 1995)
2. El elemento puede desarrollar solamente fuerzas negativas de compresión. (Wilson, 1995)

En la figura (4.5) se observa la apertura inicial que hemos asignado a la estructura.

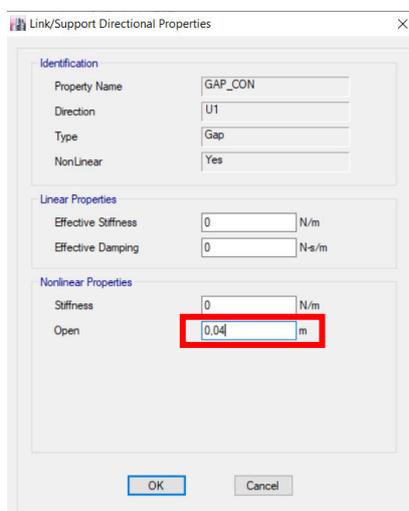


Figura 4.5: Asignación de la apertura d_0
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020).

4.2.2.2 Rigidez

El valor de rigidez se puede obtener analíticamente con la ecuación propuesta por (Abdel Raheem et al., 2019). Esta ecuación propone el uso de la rigidez lateral de la estructura más rígida. El autor menciona que este valor de rigidez puede ser calibrado al multiplicarlo por un factor γ , el cual puede ser 50 veces más rígido.

La rigidez axial propuesta por (Abdel Raheem et al., 2019) puede ser calculada de la siguiente ecuación:

$$k_{gap} = \frac{3 \cdot E \cdot I}{h^3} \quad (4.1)$$

Donde:

k_{gap} es la rigidez axial del elemento "gap"

E es el módulo de elasticidad

I es el momento de inercia, del cantiliver equivalente a la estructura más rígida.

h es la altura medida desde el suelo hasta el punto de impacto.

Mientras que (Arpitha, K. Umadevi, 2016) recomienda calcular la rigidez axial de los elementos adyacentes al impacto. Este valor de rigidez puede ser calibrado con el uso de un factor γ , este valor puede ser 10^2 a 10^4 veces más rígido que los elementos adyacentes al elemento gap. (Arpitha, K. Umadevi, 2016)

La rigidez axial propuesta por (Arpitha, K. Umadevi, 2016) puede ser calculada de la siguiente ecuación:

$$k_{gap} = \frac{E \cdot A}{b} \quad (4.2)$$

Donde:

$A = W_t \cdot t$ es el área de la superficie de impacto.

W_t es el ancho promedio de la losa.

t es el espesor de la losa.

k_{gap} es la rigidez axial del elemento "gap".

E es el módulo de elasticidad.

b es el ancho del edificio en la dirección del impacto.

A pesar de estas recomendaciones, existen investigadores que recomiendan únicamente el uso del valor de rigidez axial obtenido sin ningún factor de incremento.

En el presente estudio se utilizarán las ecuaciones (4.1) y (4.2) para obtener el valor de rigidez axial del elemento gap. Así también se ha decidido usar los factores que incrementan la rigidez en las dos ecuaciones para identificar su incidencia en el comportamiento de la estructura.

A continuación, en la tabla (4.3 y 4.4) se muestran los valores obtenidos de la ecuación (4.1) y (4.2):

Tabla 4.3:

Rigidez axial del elemento gap ecuación (4.1)

	Rigidez			
	K_{gap}	$K_{gap} \times 17$	$K_{gap} \times 34$	$K_{gap} \times 50$
	[N/m]	[N/m]	[N/m]	[N/m]
Caso 1	2.77e3	4.71e4	9.43e4	1.39e5

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Tabla 4.4:

Rigidez axial del elemento gap ecuación (4.2)

	Rigidez			
	K_{gap}	* K_{gap}	$K_{gap} \times 10^2$	$K_{gap} \times 10^4$
	[N/m]	[N/m]	[N/m]	[N/m]
Caso 2	5.92e9	8.32e9	5.92e11	5.92e13

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

* K_{gap} : es la rigidez propuesta por el autor (Jankowski,2010). La cual es considerada en el modelo de OPENSEES y en el modelo de ETABS

4.2.2.3 Grados de libertad

El elemento “gap” posee tres grados de libertad traslacionales y tres grados de libertad rotacionales en el nodo inicial y en el nodo final. Se debe tener en cuenta que dependiendo del tipo de análisis estos grados de libertad deben ser restringidos.

En la figura (4.6) se muestran los grados de libertad restringidos para el análisis del pórtico 3D.

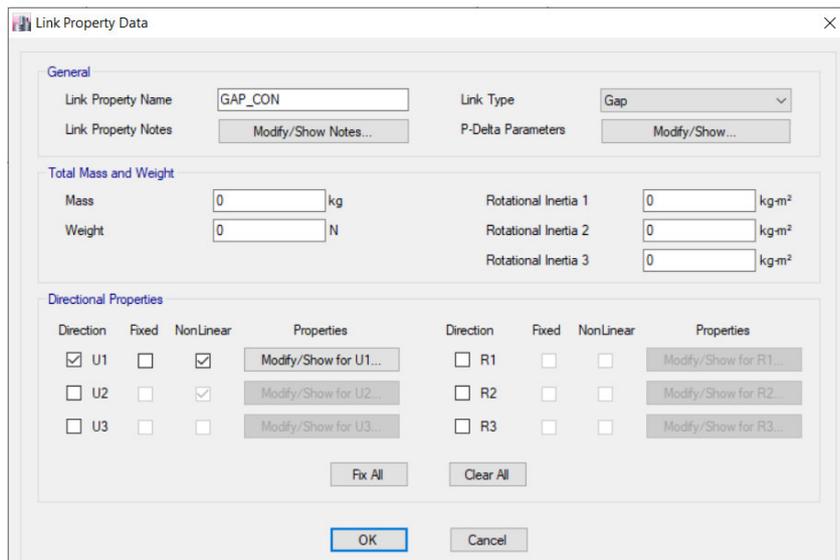


Figura 4.6: Restricciones de los grados de libertad
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

4.2.3 FUERZAS

La fuerza puede ser calculada de la siguiente manera:

$$F = \begin{cases} k_{gap}(d + open) & \text{si } (d + open) < 0 \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (4.3)$$

Donde:

k_{gap} es la rigidez axial del elemento gap.

$open$ apertura del elemento gap.

d deformación relativa del elemento gap.

4.3 CANTILIVER

Al momento de incorporar el elemento “gap” en el análisis de un pórtico espacial como se puede ver en la figura (4.7(a)), se generan interrogantes respecto a este elemento. Como es su ubicación, el número de elementos gaps a usar y el valor adecuado de rigidez. Por esta razón, se propone un sistema equivalente al propuesto por (Jankowski,2010). El sistema equivalente se puede ver en la figura (4.7(b)).

Algunas interrogantes en el sistema equivalente son eliminadas, como el número de elementos gaps a usar. Al convertirse en un sistema donde existe un solo punto probable de golpe, se usará un solo elemento gap. Además, nos permitirá:

1. Eliminar las incertidumbres.
2. Evaluar la confiabilidad del gap en el (sistema más simple) que se puede proponer.
3. Obtener los mismos desplazamientos nodales que con el modelo (Jankowski,2010) y poder comparar las respuestas en desplazamiento, así como las fuerzas que se obtienen.

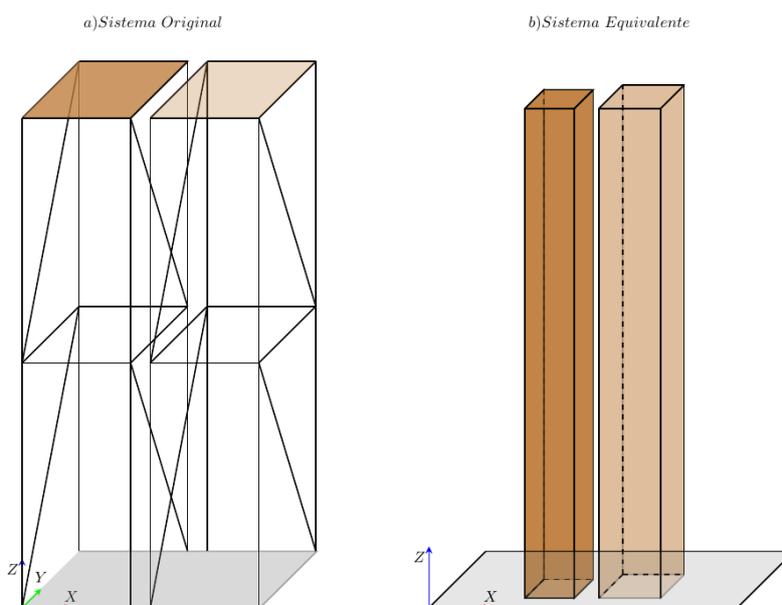


Figura 4.7: Sistema equivalente de un grado de libertad cantiliver.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Para obtener un sistema equivalente es necesario igualar los periodos, y con la ayuda de la ecuación (4.4), en la que se estableció como parámetro fijo a la masa. Se procede a obtener la rigidez calculando la dimensión de la sección transversal adecuada (b).

$$T = 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.4)$$

Donde:

T es el periodo de vibración de una estructura

m es la masa concentrada de la estructura

k es la rigidez de los elementos estructurales

De la ecuación (4.5) despejamos k la cual para el caso de voladizos es igual $\frac{3 \cdot E \cdot I}{L^3}$.

Despejamos el valor I y la ecuación (4.5) nos queda de la siguiente forma:

$$I = \frac{(2\pi)^2 m L^3}{3T^2 E} \quad (4.5)$$

El valor de la inercia para secciones cuadradas es igual a $\frac{b^4}{12}$. Este valor será reemplazado en la ecuación (4.5), de tal manera que el siguiente paso sea obtener el valor de b . La ecuación queda de la siguiente manera:

$$b_2 = \sqrt[4]{\frac{4\pi^2 m_2 L_2^3}{3E_2 T_1^2}} \quad (4.6)$$

Donde:

T es el periodo de vibración de una estructura.

E es el módulo de elasticidad del acero.

m es la masa concentrada de la estructura.

L es la longitud total medida desde el suelo hasta el nivel de la masa.

b es el valor correspondiente a las dimensiones del cantiliver.

En la tabla (4.5) se observan los valores correspondientes al sistema idealizado, que será tomado en cuenta para realizar una comparación de los parámetros que influyen en la implementación del elemento gap.

Tabla 4.5:

Dimensiones de la estructura equivalente para la estructura 1 y 2

Elemento	B	h	L
	[m]	[m]	[m]
Estruc. 1	0.01515	0.01515	1
Estruc. 2	0.02178	0.02178	1

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

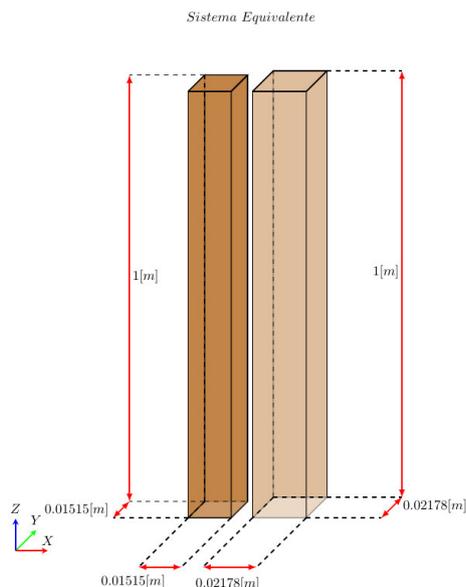


Figura 4.8: Sistema equivalente
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

4.3.1 RIGIDEZ

Los valores de rigidez se han calculado para este caso con la ecuación (4.1) propuesta por (Abdel Raheem et al., 2019). En la tabla (4.3) se observan los valores a ser usados.

4.3.2 GRADOS DE LIBERTAD

El sistema equivalente los grados de libertad restringidos únicamente serán los correspondientes a X, debido a que el problema se desarrolla en la dirección XY. Como se observa en la figura (4.9).

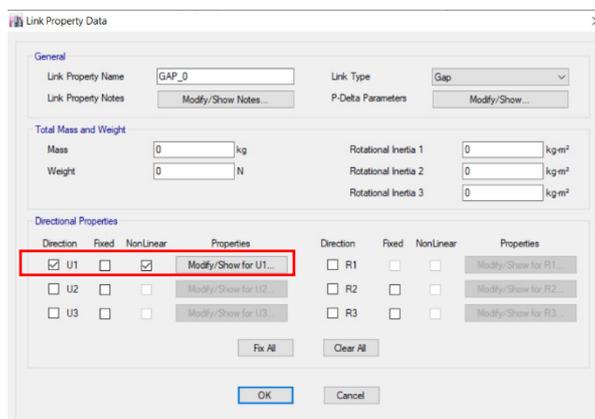


Figura 4.9: Restricción de los grados de libertad
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

4.4 CALIBRACIÓN OPENSEES Y ETABS DE MODELOS EN EL RANGO LINEAL.

Para las comparaciones entre OpenSees y ETABS del siguiente capítulo, se realizó una calibración de modelos cantiliver y pórtico espacial en el rango lineal (ver Figura 4.10).

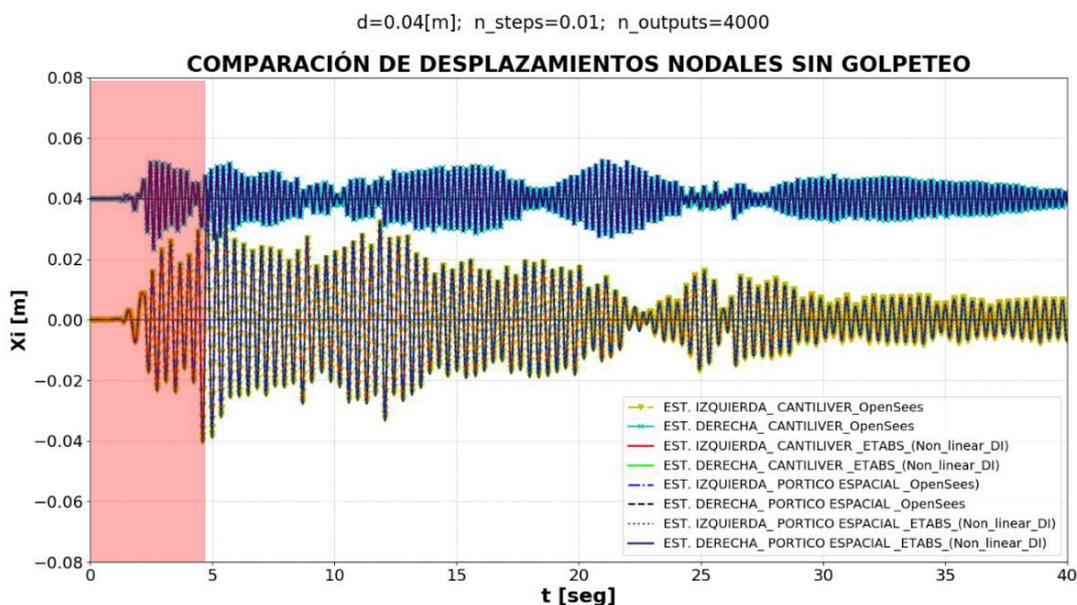


Figura 4.10: Calibración de modelos OpenSees y ETABS.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Se logra obtener desplazamientos nodales que no son exactamente iguales, pero si muy parecidos y se puede asegurar que las zonas de interés y el primer impacto está sucediendo en los mismos lugares.

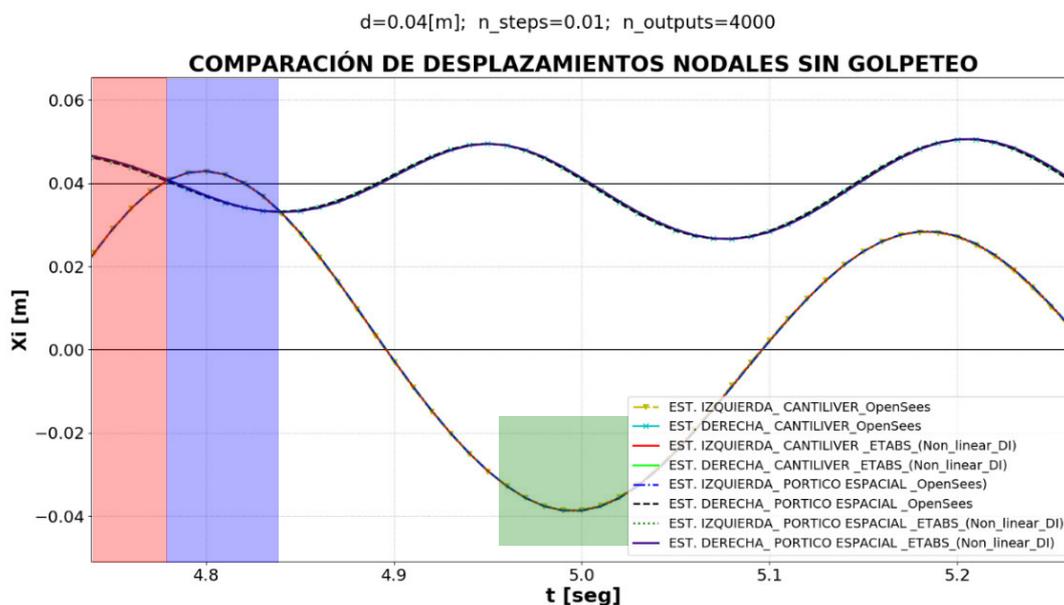


Figura 4.11: Acercamiento a las zonas de interés.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

CAPÍTULO 5: RESULTADOS

5.1. RESULTADOS OPENSEES

5.1.1 RESPUESTA DINÁMICA CON FUERZAS DE COLISIÓN.

5.1.1.1 Caso 1

Después de haber analizado y obtenido las respuestas dinámicas con y sin fuerzas resta por colocarlas todas en un mismo gráfico para evidenciar los efectos que genera la presencia de los choques en la dinámica en desplazamiento de las masas colindantes (ver Figura 5.1) ocasionando reducciones y amplificaciones en los desplazamientos. Además, ocasiona que desaparezcan colisiones esperadas si se analizara sin fuerzas de colisión y que aparezcan nuevas colisiones en otro momento de tiempo.

También es importante señalar que en los modelos con fuerza de colisión después de la última colisión ambas estructuras sufren un proceso de restitución a lo que sería los desplazamientos sin las fuerzas de colisión.

Se aclara que para los resultados en OpenSees (subcapítulo 5.1.1) se consideró la no linealidad del material del acero como modelo bilineal "Steel 01"; $n_pasos=4'000000$; $T_discretizacion=0.00001$; $\bar{\beta} = 8.32e9 \left[\frac{N}{m^2} \right]$.

Las aceleraciones nodales con y sin fuerzas de colisión, fuerzas de colisión y bucles de histéresis son mostradas en (ver Figura 5.2 y 5.3)

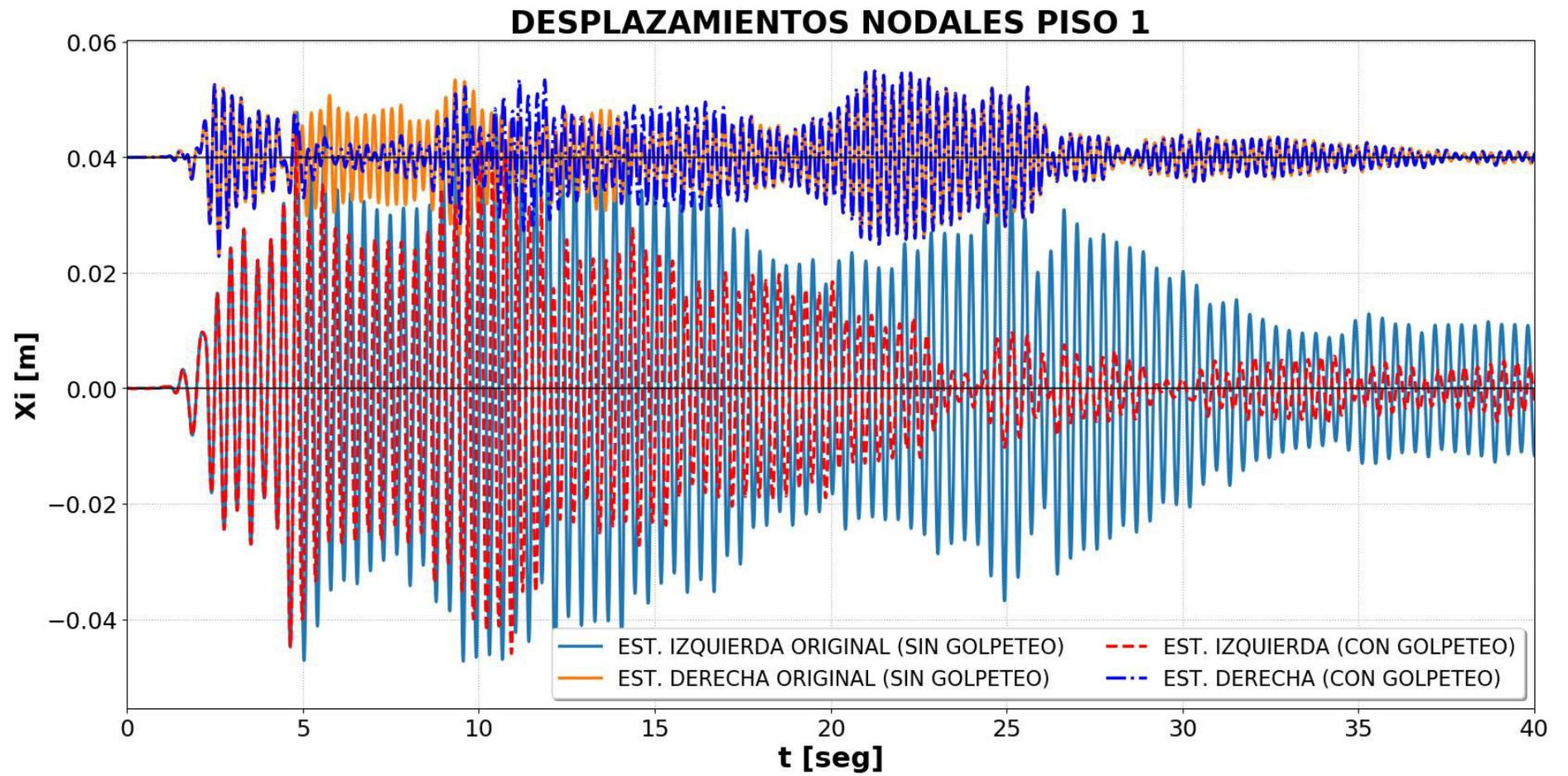
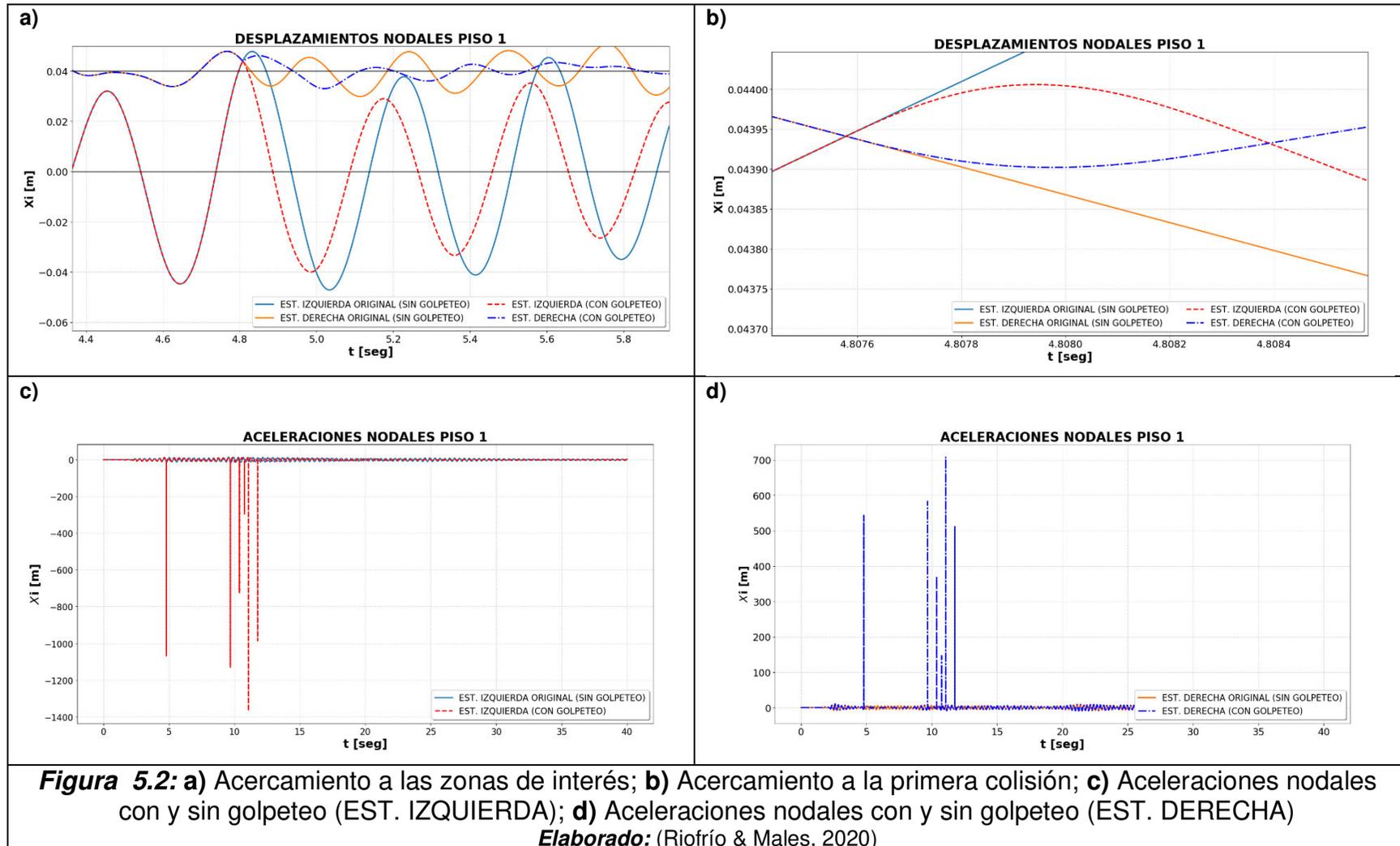


Figura 5.1: Desplazamientos nodales con y sin fuerza de colisión CASO 1

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)



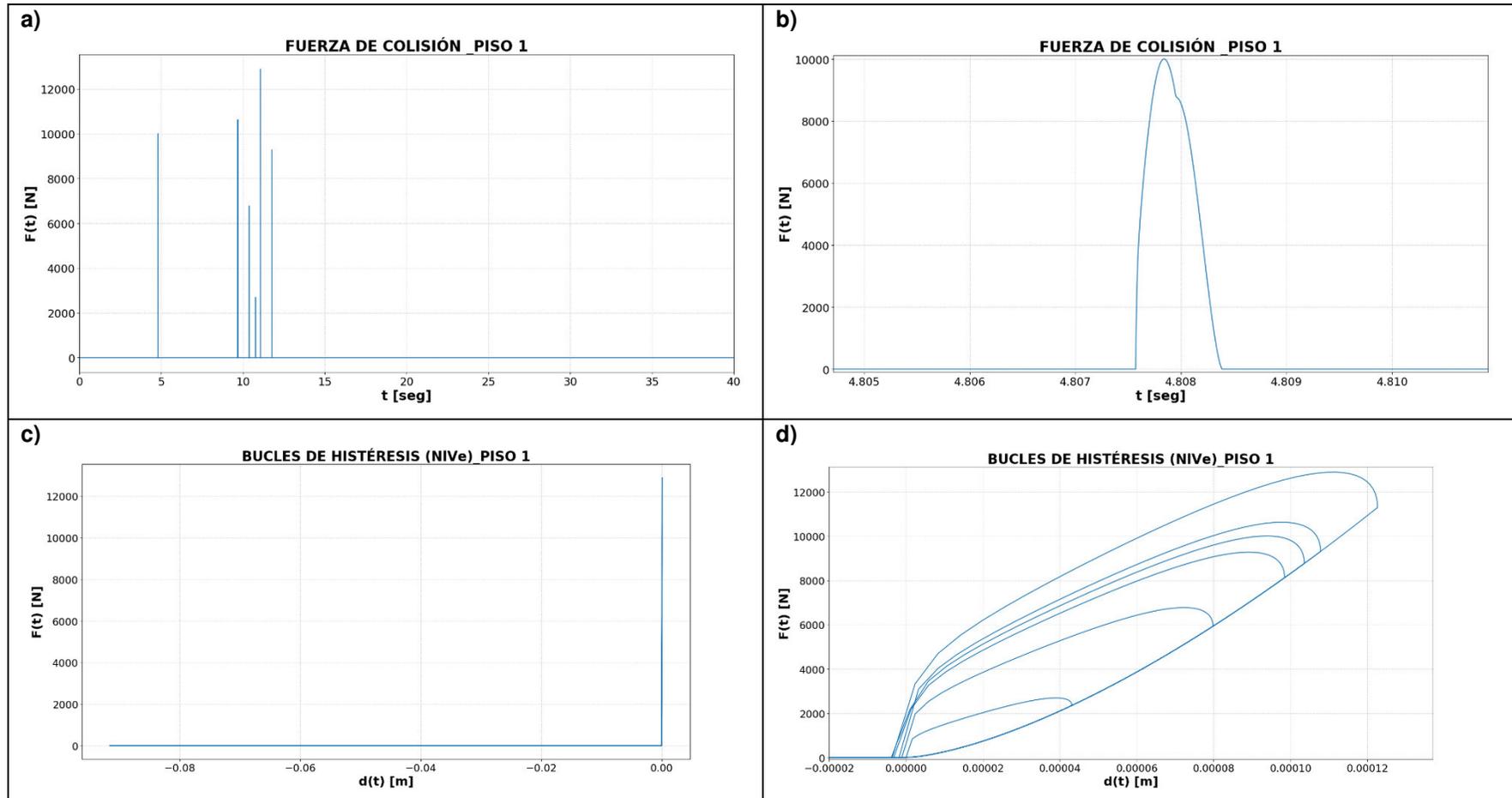


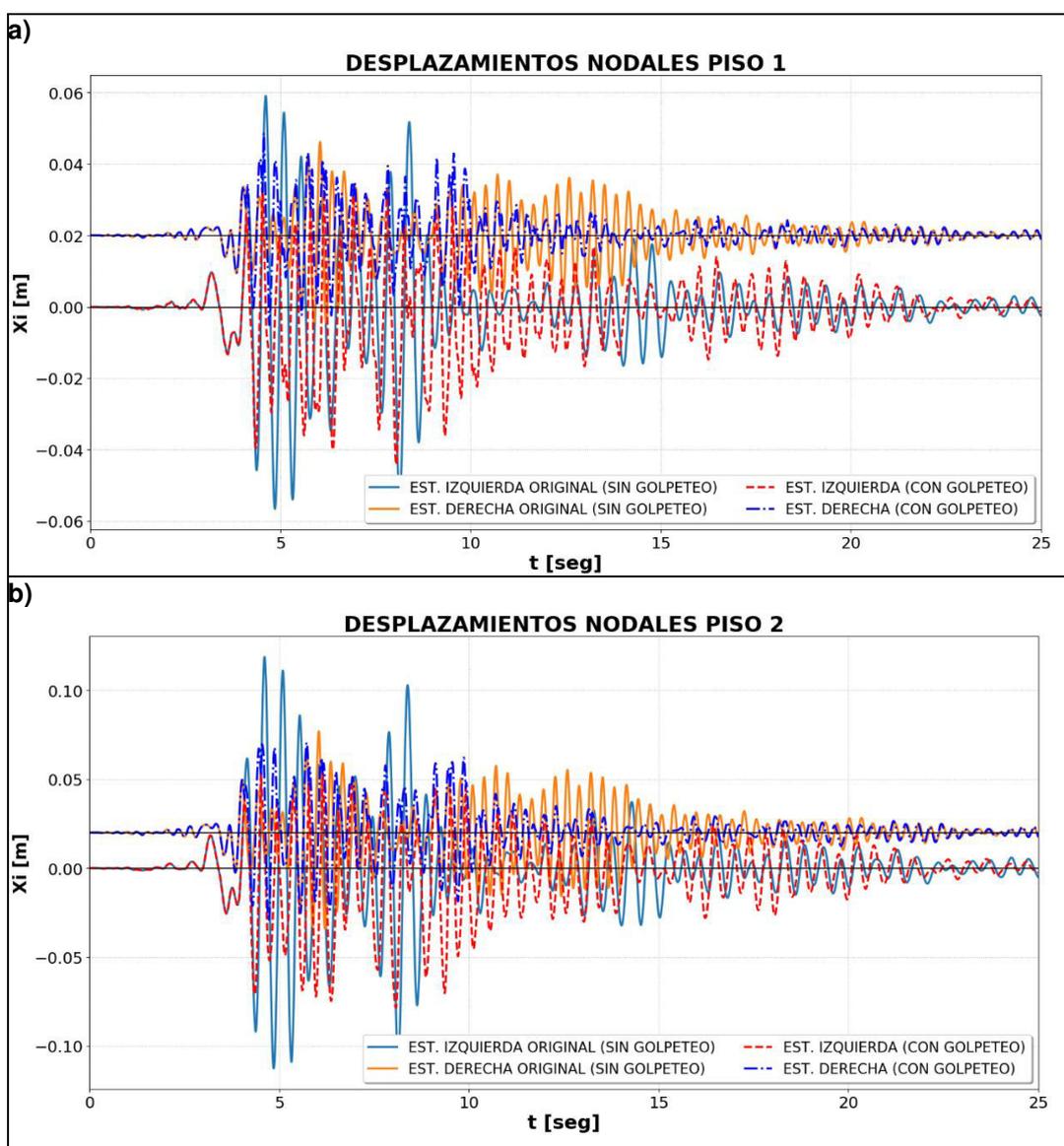
Figura 5.3: a) Fuerzas de colisión de todo el evento sísmico; b) Primera fuerza de colisión; c) Bucles de histéresis ; d) Acercamiento bucles de histéresis.

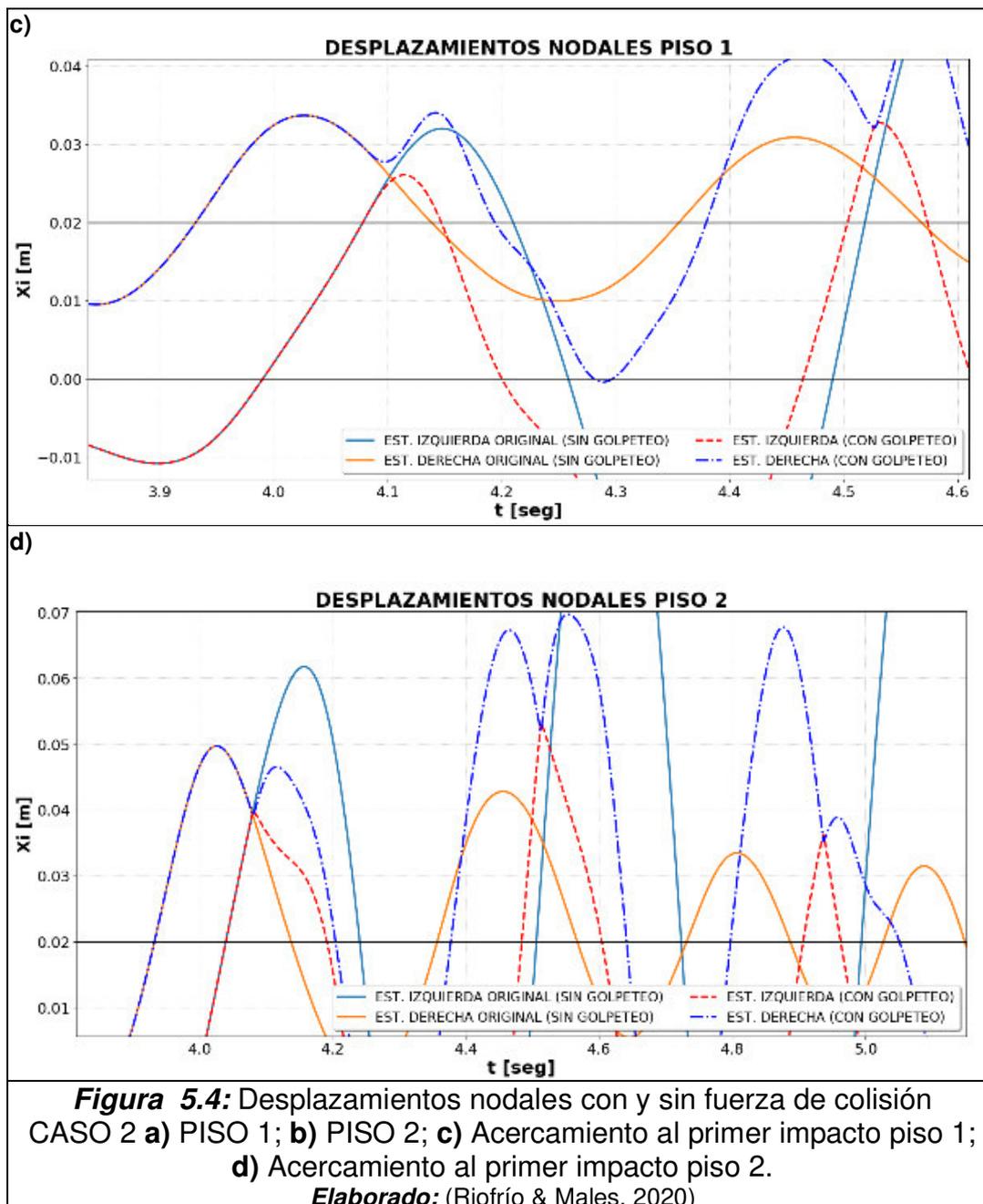
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.1.1.2 Caso 2

Es evidente que las respuestas dinámicas de desplazamientos nodales con fuerzas de colisión han cambiado totalmente (ver Figura 5.4 a, b).

Es importante remarcar que la primera fuerza de colisión durante el evento sísmico sucede en el segundo piso (ver Figura 5.4 d), modificando la respuesta dinámica de todo el sistema posterior que sucede provocando que en el primer piso desaparezca el primer impacto que se esperaba en el piso 1 (ver Figura 5.4 c). Por lo tanto, cuando se trata con esta patología es imprescindible determinar el momento del primer impacto,





Las aceleraciones nodales con y sin fuerzas de colisión, fuerzas de colisión y bucles de histéresis son mostradas en (ver Figura 5.5 y 5.6)

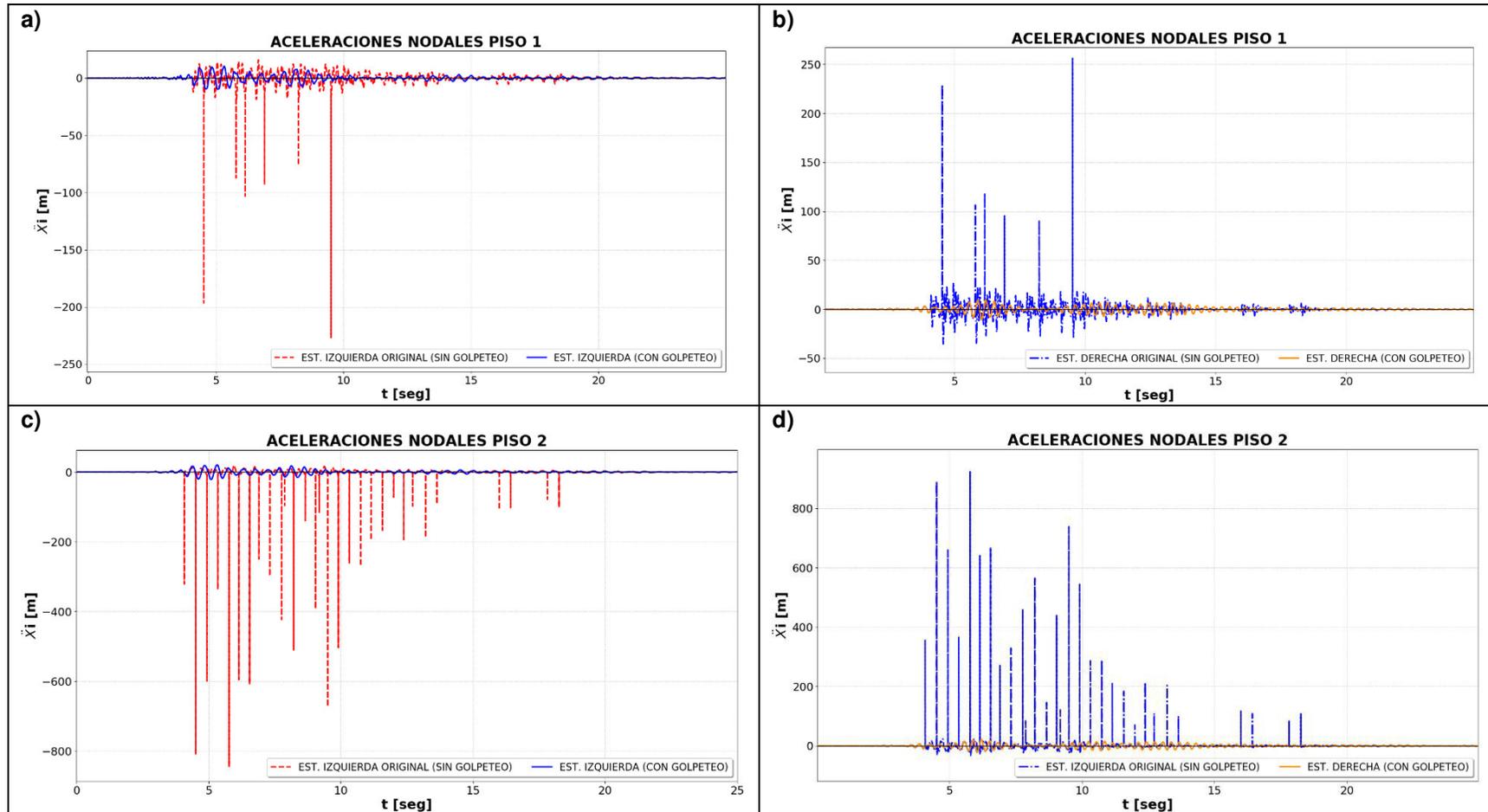


Figura 5.5: Aceleraciones nodales con y sin golpeteo
a) (EST. IZQUIERDA) PISO 1; **b)** (EST. DERECHA) PISO 1; **c)** (EST. IZQUIERDA) PISO 2; **d)** (EST. IZQUIERDA) PISO 2

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

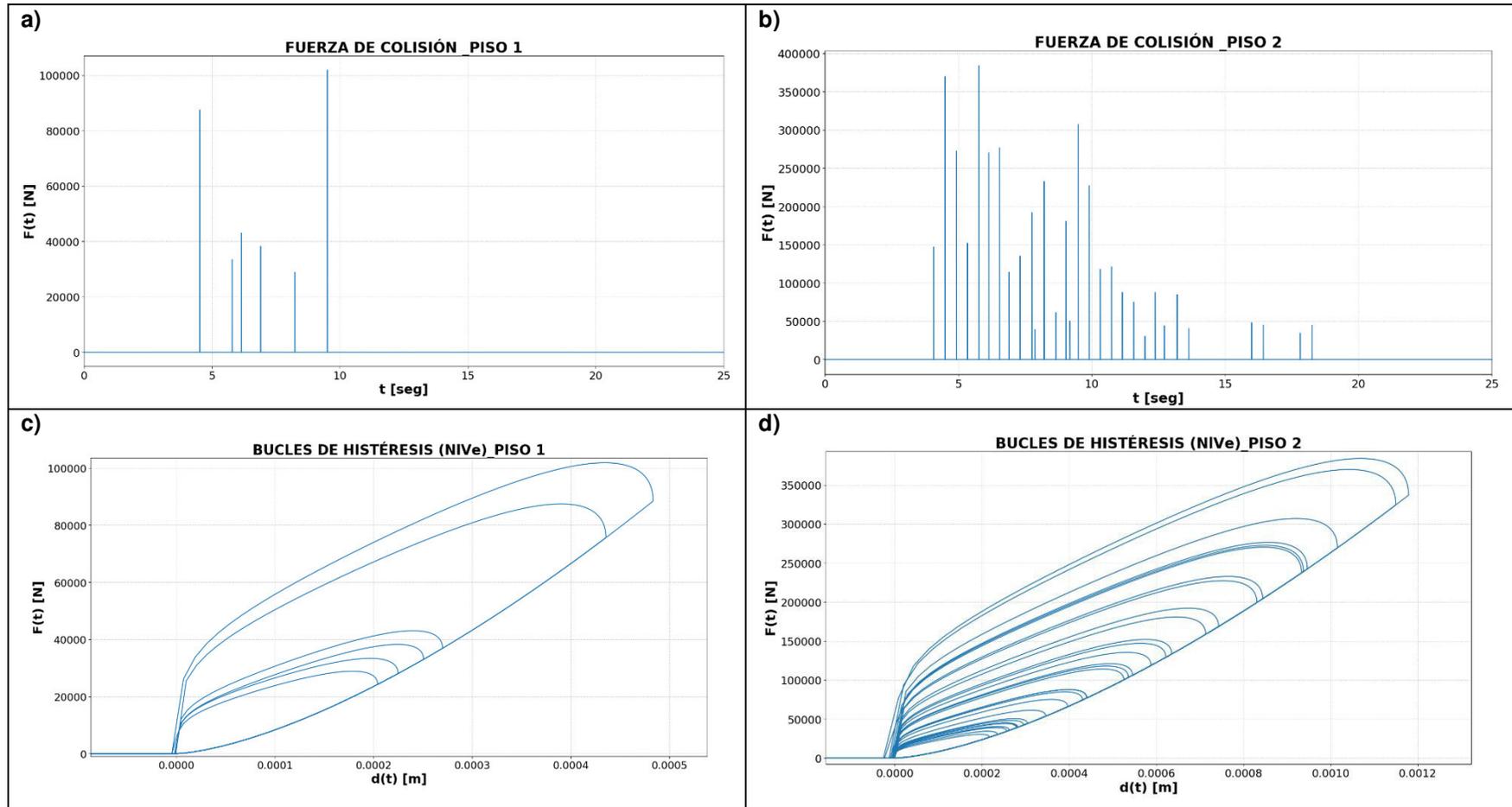


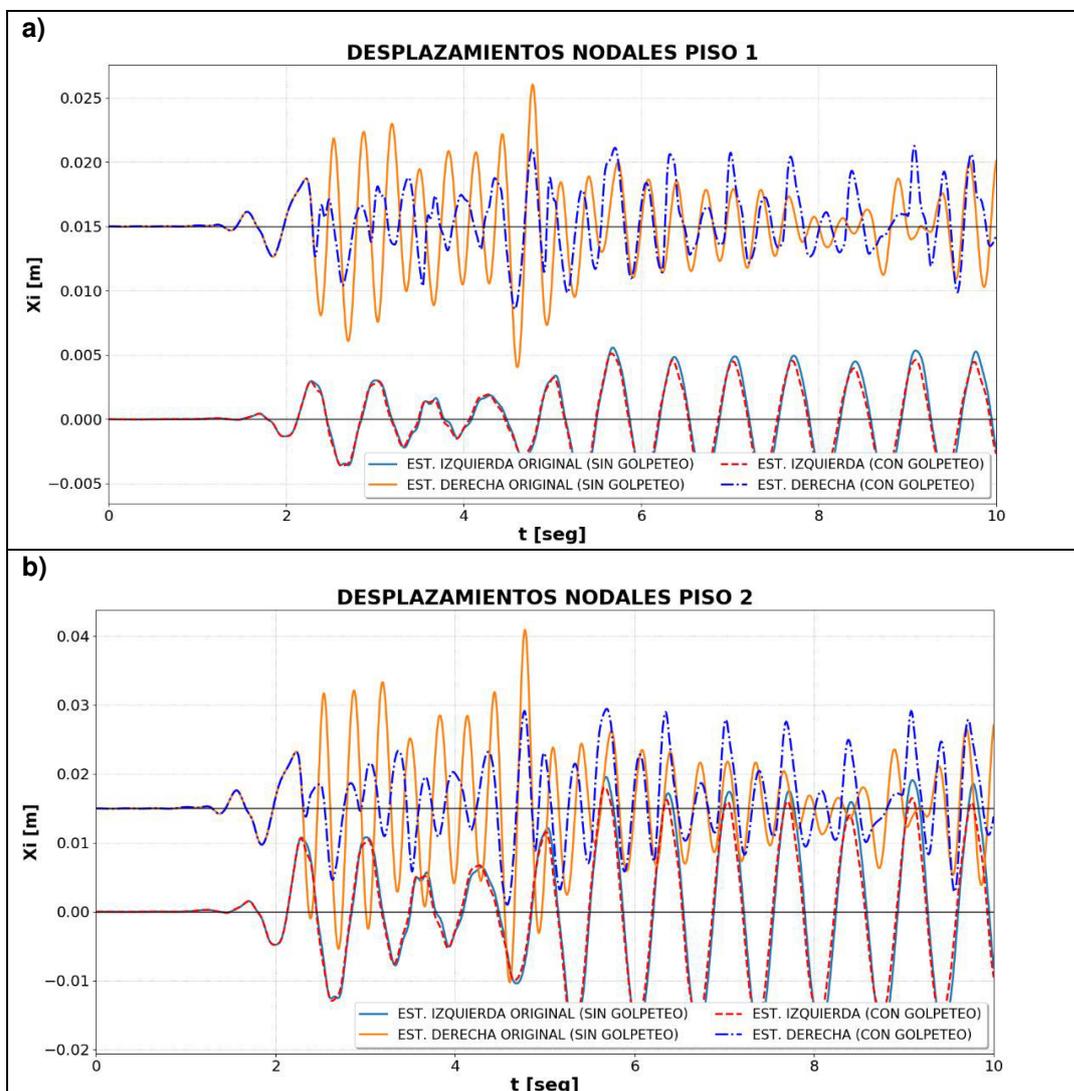
Figura 5.6: Fuerzas de colisión de todo el evento sísmico y bucles de histéresis.

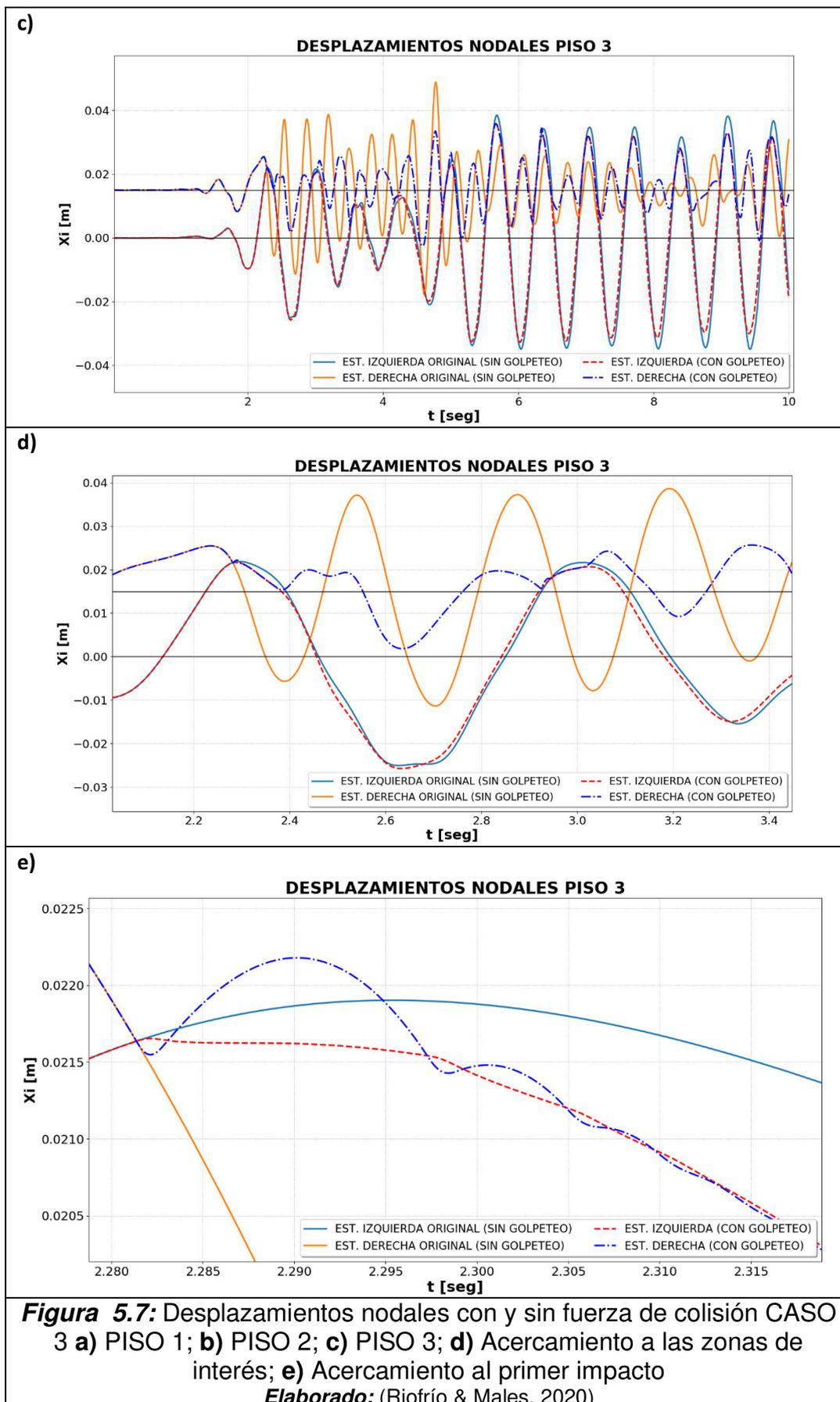
a) PISO 1; b) PISO 2; c) PISO 1; d) PISO 2

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.1.1.3 Caso 3

En la Figura 5.7 se observa las variaciones en desplazamientos nodales de los pisos, y se debe poner atención en un comportamiento no observado en los anteriores dos casos (ver Figura 5.7 d & e).





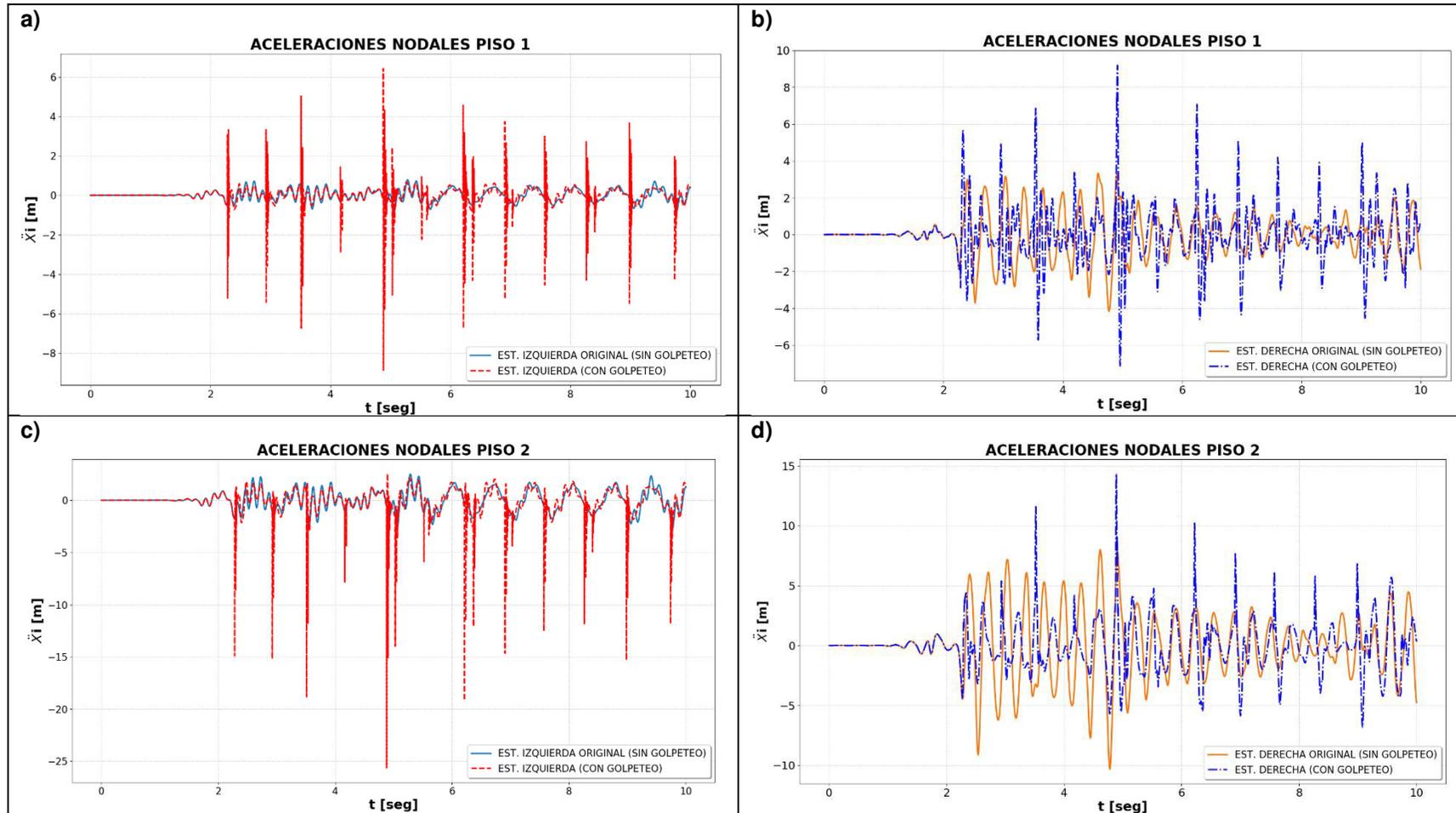
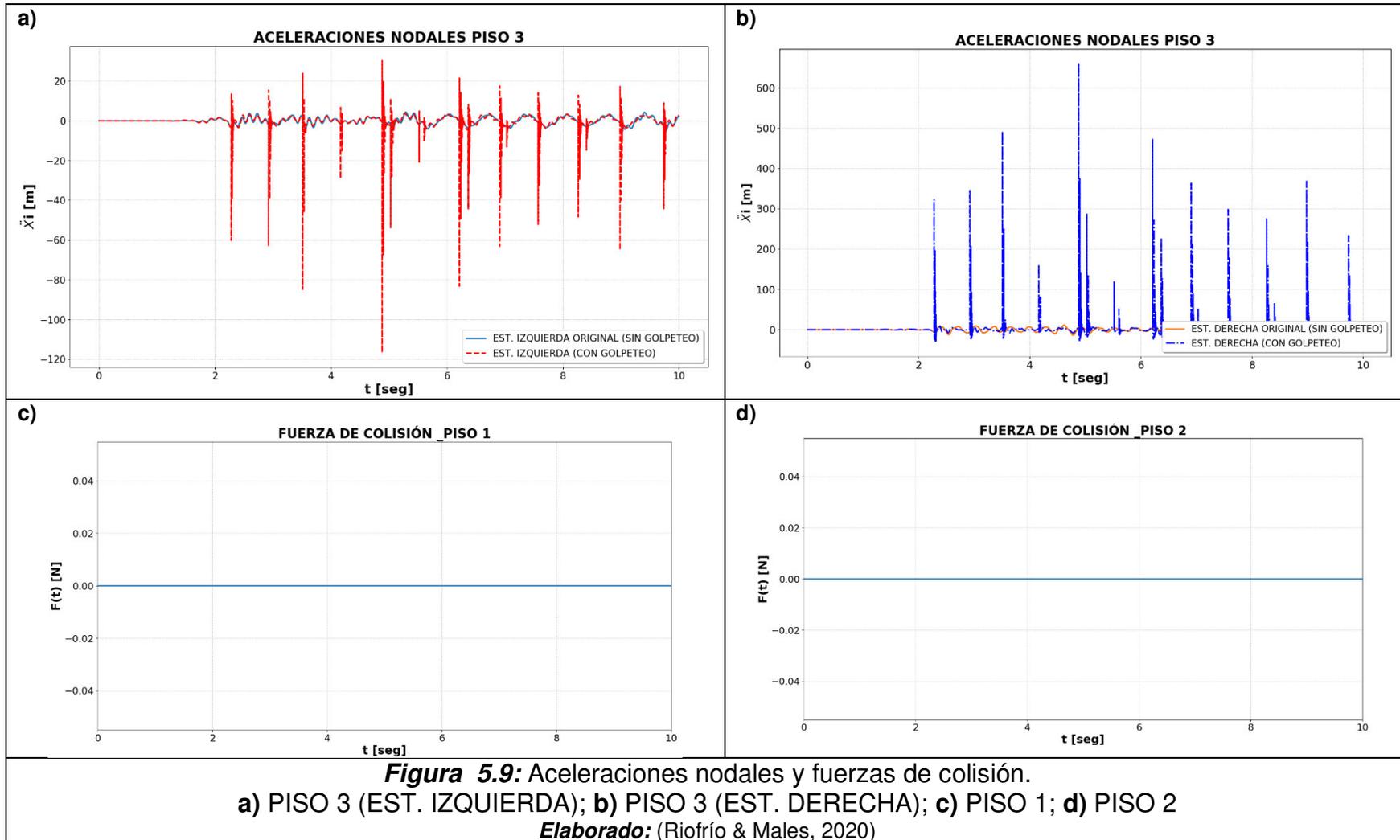


Figura 5.8: Aceleraciones nodales.

a) PISO 1 (EST. IZQUIERDA); **b)** PISO 1 (EST. DERECHA); **c)** PISO 2 (EST. IZQUIERDA); **d)** PISO 2 (EST. DERECHA)

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)



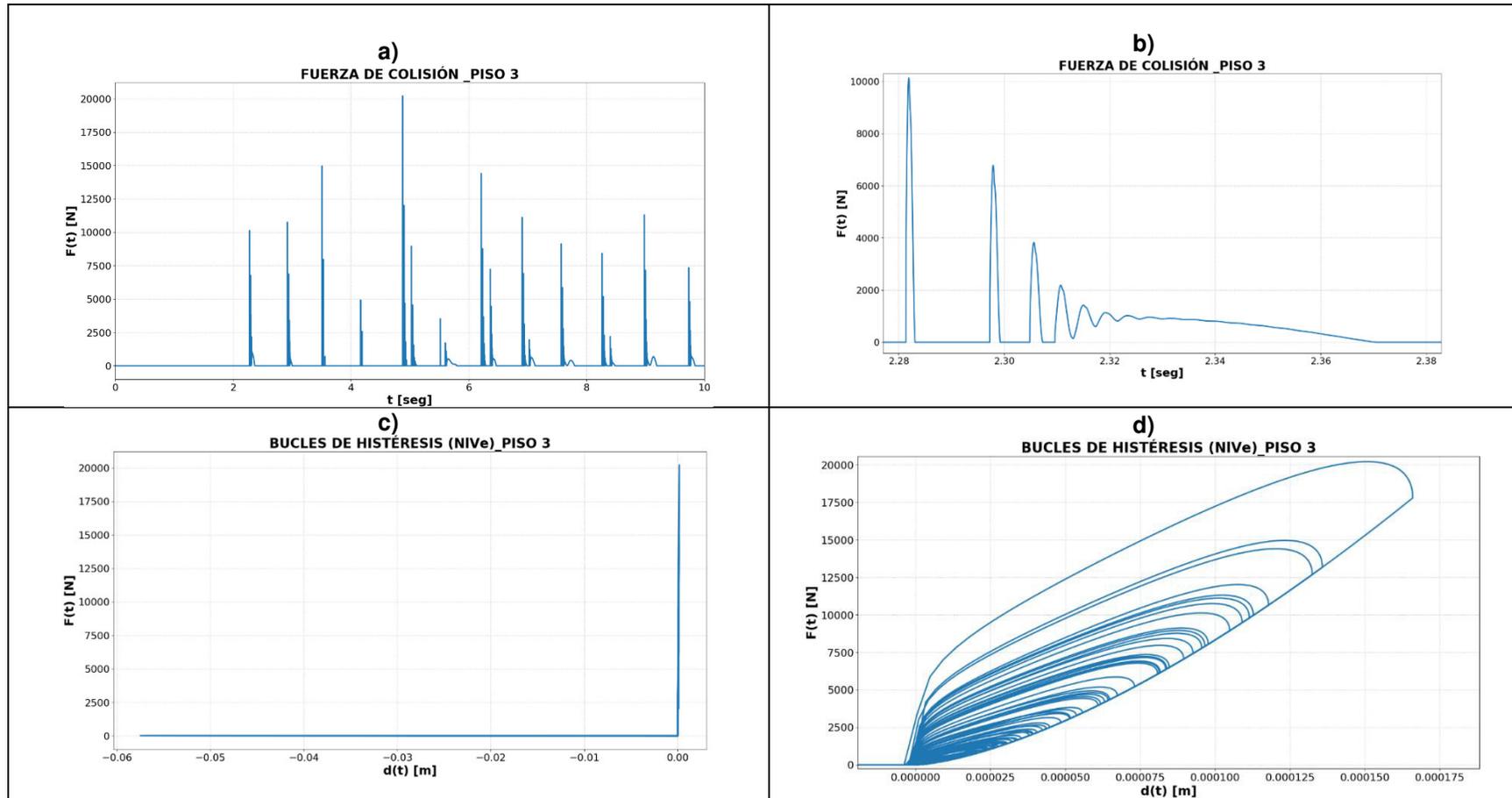


Figura 5.10: Fuerzas de colisión de todo el evento sísmico y bucles de histéresis.

a) Fuerza de colisión de todo el evento sísmico PISO 3; **b)** Primera Fuerza de colisión PISO 3; **c)** Bucle de histéresis de todo el evento sísmico PISO 3; **d)** Acercamiento del bucle de histéresis PISO 3

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

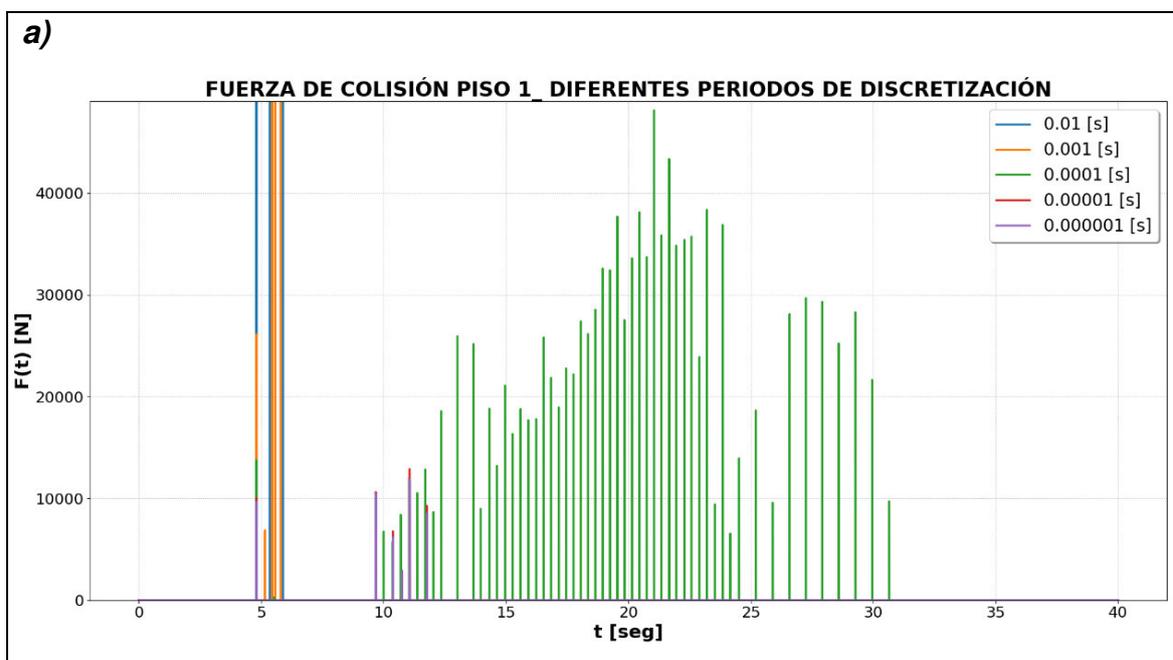
5.1.2 FUERZAS DE COLISIÓN CON DIFERENTES PERÍODOS DE DISCRETIZACIÓN

5.1.2.1 Caso 1

Con la ayuda del modelo “viscoelástico no lineal” se logra obtener fuerzas de colisión y para cada caso de estudio se analizó con diferentes intervalos de tiempo también llamados periodos de discretización (ver Figura 5.11 a) lo que puede generar cambios significativos (ver Figura 5.11 b).

Hay que mencionar que en ningún análisis dinámico existente se menciona algún criterio para seleccionar el periodo de discretización, de tal manera que la única forma de aceptar o no el valor de las fuerzas es mediante la examinación progresiva de algunas variables como la primera fuerza de colisión, **F_{gap_max}** (fuerza de colisión máxima) y **F_{Nchoque}** (número de colisiones en el evento sísmico), hasta el punto donde no exista mayor cambio (ver Tabla 5.1.) teniendo en cuenta que se debe hacer un equilibrio entre costo de procesamiento computacional y la confiabilidad de los resultados (*Kharazian & Almansa, 2017*).

Es evidente entonces, que una primera buena aproximación sería con un periodo de discretización de 0.00001 (ver Tabla 5.1).



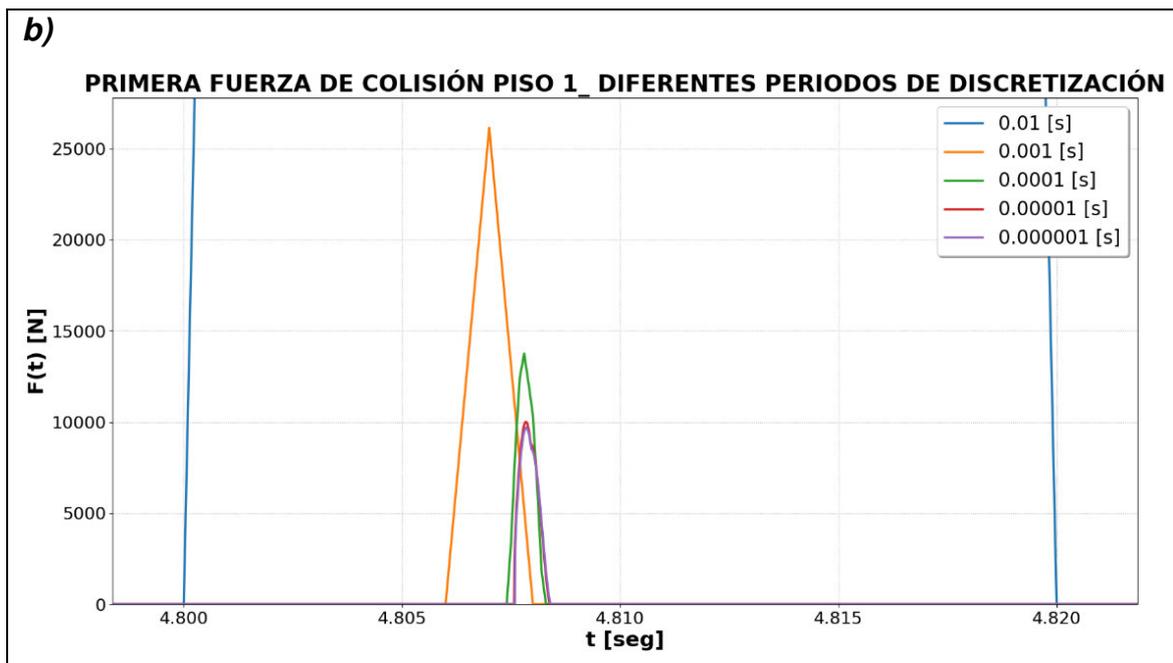


Figura 5.11: Fuerzas de colisión con diferentes periodos de discretización caso 1 **a)** Todo el evento sísmico & **b)** Ampliación a la primera fuerza de colisión
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Tabla 5.1:

Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 1

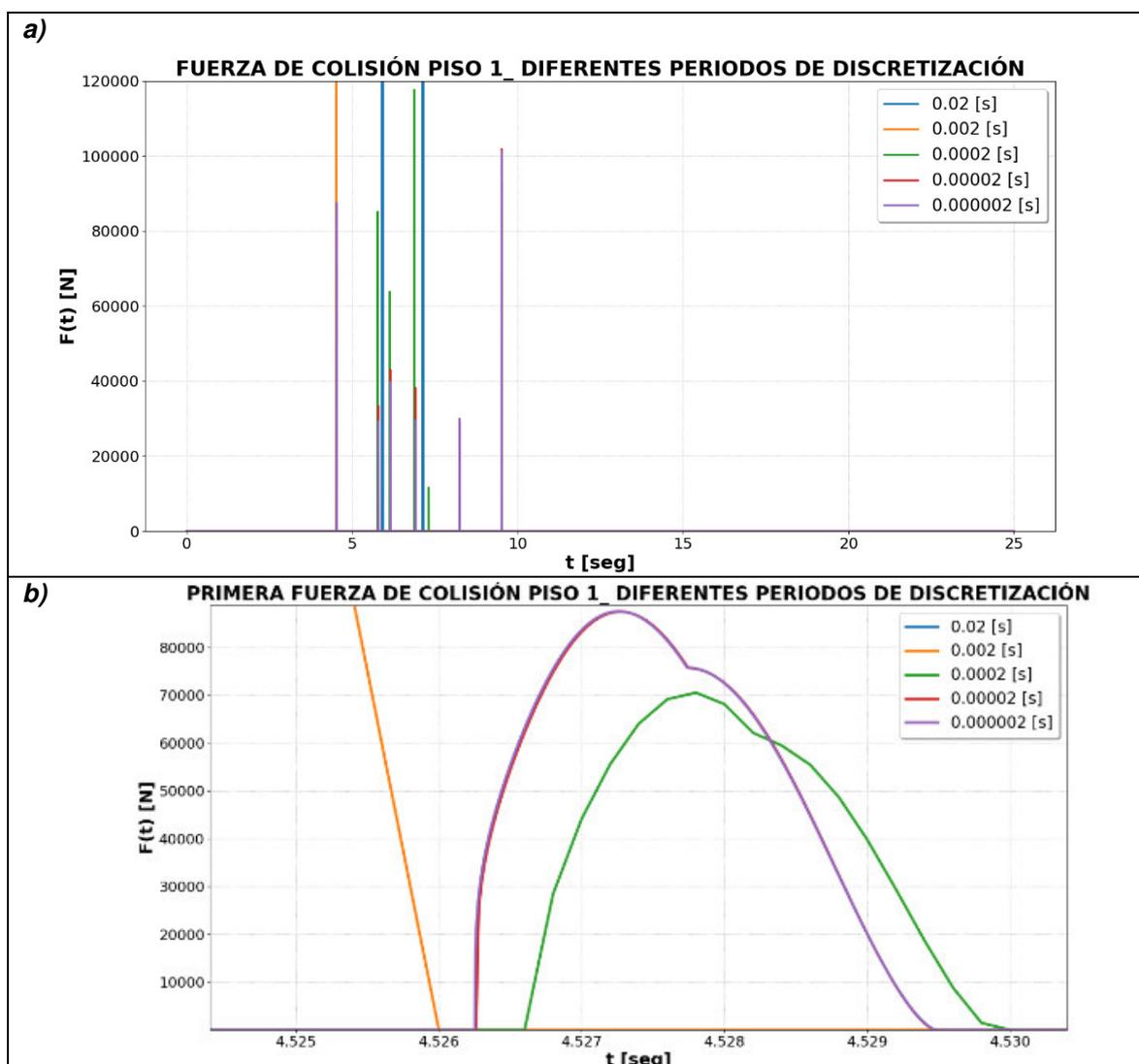
<i>tiempo_</i>	<i>tasa_</i>	<i>n_</i>	<i>costo_</i>	<i>F_N</i>	<i>Fgap_primer</i>		<i>Error</i>	<i>Fgap_max</i>		<i>Err</i>
<i>anal</i>	<i>muest</i>		<i>compu</i>	<i>choq</i>				(1er piso)	<i>tiempo</i>	
[seg]		<i>pasos</i>	<i>tacion</i>	<i>1er</i>	[N]	[seg]	[%]	[N]	[seg]	[%]
			[min]	piso						
40	0.01	4.00E+03	420	3	1108175.22	4.8 a 4.83		7.42E+17	5.9 a 40.01	
40	1.00E-03	4.00E+04	1320	5	26146.062	4.806 a 4.809	97.64	2.654E+13	5.806 a 5.809	100
40	1.00E-04	4.00E+05	16.83	57	13760.689	4.8074 a 4.8084	47.37	48130.290	21.056 9 a 21.057 7	100
40	1.00E-05	4.00E+06	375.3	6	10008.728	4.8075 a 4.8084	27.27	12890.969	11.071 6 a 11.072 4	73.2
40	1.00E-06	4.00E+07	1342.8	6	9695.186	4.8075 a 4.8084	3.13	11869.754	11.074 5 a 11.075 3	7.92

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.1.2.2 Caso 2

Para este caso es relevante que la primera fuerza de colisión que sucede en el sistema se genera en el segundo piso (ver Figura 5.12 c, d), y esto ocasiona que la primera colisión esperada en el primer piso se modifique (ver Figura 5.12 a, b).

Además, se observa que dependiendo del periodo de discretización al igual que en el caso anterior puede generar cambios significativos de valor de la primera fuerza de colisión (ver Figura 5.12 d), sin embargo, la primera fuerza de colisión del primer piso no sigue este patrón (ver Figura 5.12 b) a causa de las modificaciones que ejerce la primera fuerza de impacto en el sistema. Las magnitudes de las fuerzas de colisión y los tiempos en los que se genera se resumen en las Tablas 5.2 y 5.3.



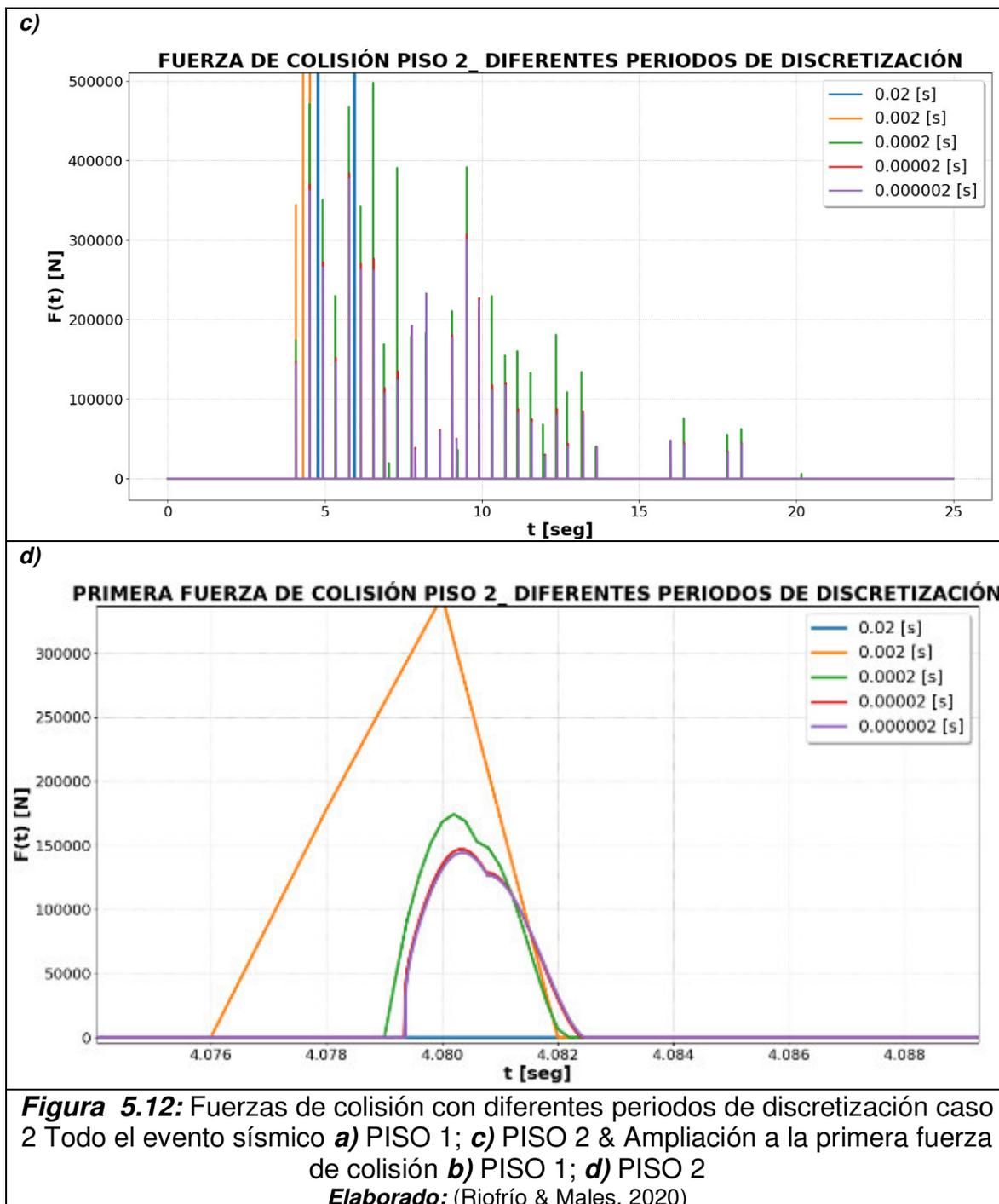


Tabla 5.2:

Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 2 (piso 1)

tiem po_ anali zado [seg]	tasa_ muest reo	n_ pasos	costo_ comput acional [min]	F_N choq ues 1er piso	Fgap_primer impacto		Error [%]	Fgap_max		Error [%]
					[N]	seg		(1er piso)	tiempo	
								[N]	[seg]	
25	0.02	1.25E +03	420	2	132697859.	5.9 a 5.96		3.09E+1 3	7.12 a 7.18	
25	2.00E -03	1.25E +04	1320	1	930332.284	4.0760 a 4.5280	99.30	930332. 284	4.0760 a 4.5280	100
25	2.00E -04	1.25E +05	16.83	6	70506.835	4.5266 a 4.5302	92.42	117609. 5232	6.8804 a 6.8838	87
25	2.00E -05	1.25E +06	375.3	6	87425.411	4.5662 a 4.5295	24.00	101835. 522	9.517 a 9.5202	13
25	2.00E -06	1.25E +07	1342.8	6	87492.236	4.5262 a 4.5294	0.08	101231. 4463	9.5176 5 a 9.5208	0.59

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)**Tabla 5.3:**

Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 2 (piso 2)

F_N choques 2do piso	Fgap_primer impacto		Error [%]	Fgap_max		Error [%]
	[N]	seg		(1er piso)	tiempo	
				[N]	[seg]	
2	5292355.462	4.76 a 4.82		7.10E+09	5.92 a 5.98	
3	344340.6728	4.076 a 4.084	93.49	3143188.21	4.52 a 4.528	99.96
30	174317.532	4.079 a 4.0824	49.38	497790.3415	6.5346 a 6.5374	84.16
30	147021.6492	4.0793 a 4.0824	15.66	383963.6623	5.7767 a 5.7794	22.87
30	144311.1354	4.0793 a 4.0824	1.84	376652.9713	5.7779 a 5.7805	1.90

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.1.2.3 Caso 3

Para este caso es relevante que todas las fuerzas de colisión se generan en el tercer piso (ver Figura 5.13. c), mientras que en el segundo y primer piso no existe ningún impacto (ver Figura 5.13. a, b) esto se debe en gran parte que las estructuras ensayadas se desplazan mayormente de acuerdo a su primer modo de vibración.

Además, se observa que dependiendo del periodo de discretización al igual que en el caso anterior puede generar cambios significativos de valor máximo de fuerza de colisión, numero de colisiones y el momento en el que aparecen. (ver Tablas 5.4, 5.5 & 5.6).

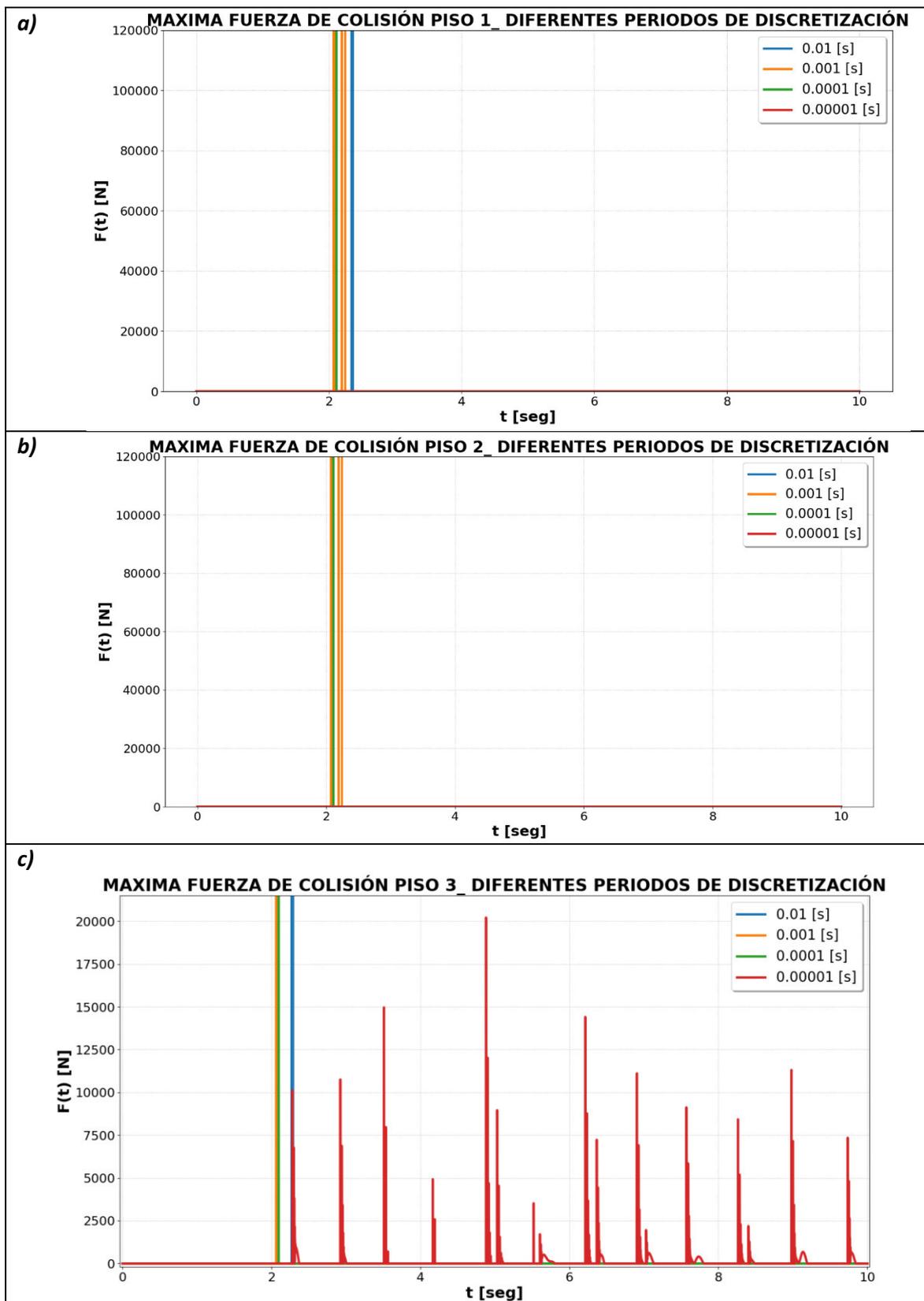


Figura 5.13: Fuerzas de colisión con diferentes periodos de discretización caso 3 Todo el evento sísmico **a)** PISO 1; **b)** PISO 2 **c)** PISO 3

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Tabla 5.4:

Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 3 (piso 1)

tiempo analizado	tasa_ muestras	n_ pasos	costo_ computacional	F_N choques	Fgap_primer impacto		Error	Fgap_max		Error
								(1er piso)	tiempo	
[seg]			[min]	1er piso	[N]	seg	[%]	[N]	[seg]	[%]
10	0.01	1.25E+03	6	1	825474 904.1	2.34 a 2.37		825474 904.1	2.34 a 2.37	
10	1.00E-03	1.25E+04	2040	3	4.24E+07	2.07 a 2.073	94.8 7	1.26E+18	2.245 a 10	15274843 5232.11
10	1.00E-04	1.25E+05	1130	1	786588 321	2.1117 a 2.1120	1756 .26	786588 321	2.1117 a 2.1120	100.00
10	1.00E-05	1.25E+06	506	0	0	0	100. 00	0	0	100.00

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)**Tabla 5.5:**

Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 3 (piso 2)

F_N	Fgap_primer impacto		Error	Fgap_max		Error
choques				(1er piso)	tiempo	
2do piso	[N]	seg	[%]	[N]	[seg]	[%]
0	[-]	[-]		[-]	[-]	
3	5.20E+09	2.076 a 2.079	[-]	8.79E+17	2.245 a 10	[-]
1	6726856.374	2.1112 a 2.1115	99.87	497790.3415	6.5346 a 6.5374	100.00
0	0	0	100.00	0	0	100.00

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)**Tabla 5.6:**

Fuerza de colisión variando los periodos de discretización Caso 3 (piso 3)

F_N	Fgap_primer impacto		Error	Fgap_max		Error
choques				(1er piso)	tiempo	
3er piso	[N]	seg	[%]	[N]	[seg]	[%]
1	853511.0517	4.76 a 4.82		853511.0517	4.76 a 4.82	
1	1.03E+06	2.064 a 2.067	20.34	1.03E+06	2.064 a 2.067	20.34
1	243150.0214	2.0967 a 2.0970	76.33	243150.0214	2.0967 a 2.0970	76.33
70	147021.6492	2.2813 a 2.2831	39.53	20217.3362	4.88041 a 4.88194	91.69

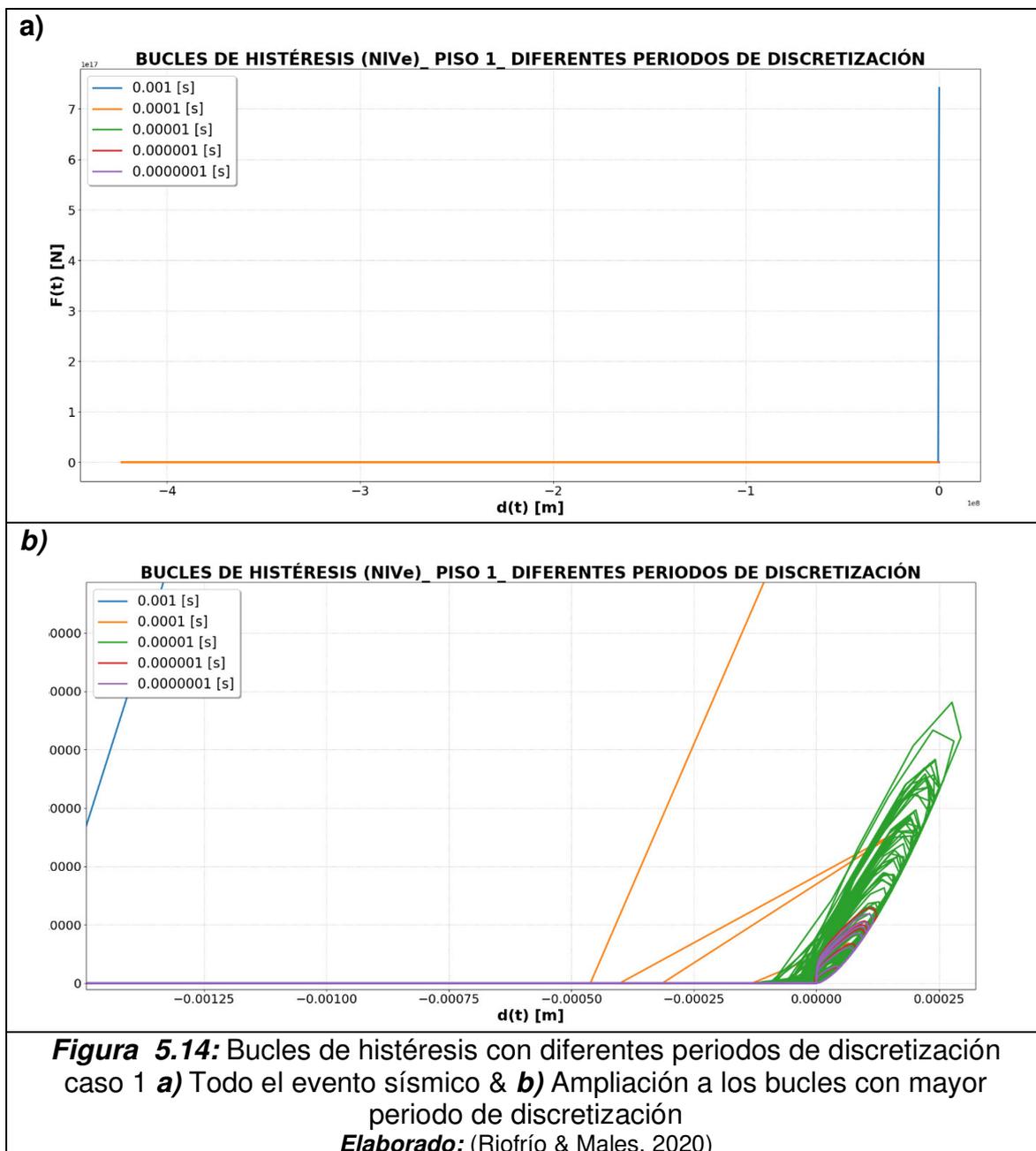
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.1.3. BUCLES DE HISTÉRESIS (ENERGÍA DISIPADA)

5.1.3.1 Caso 1

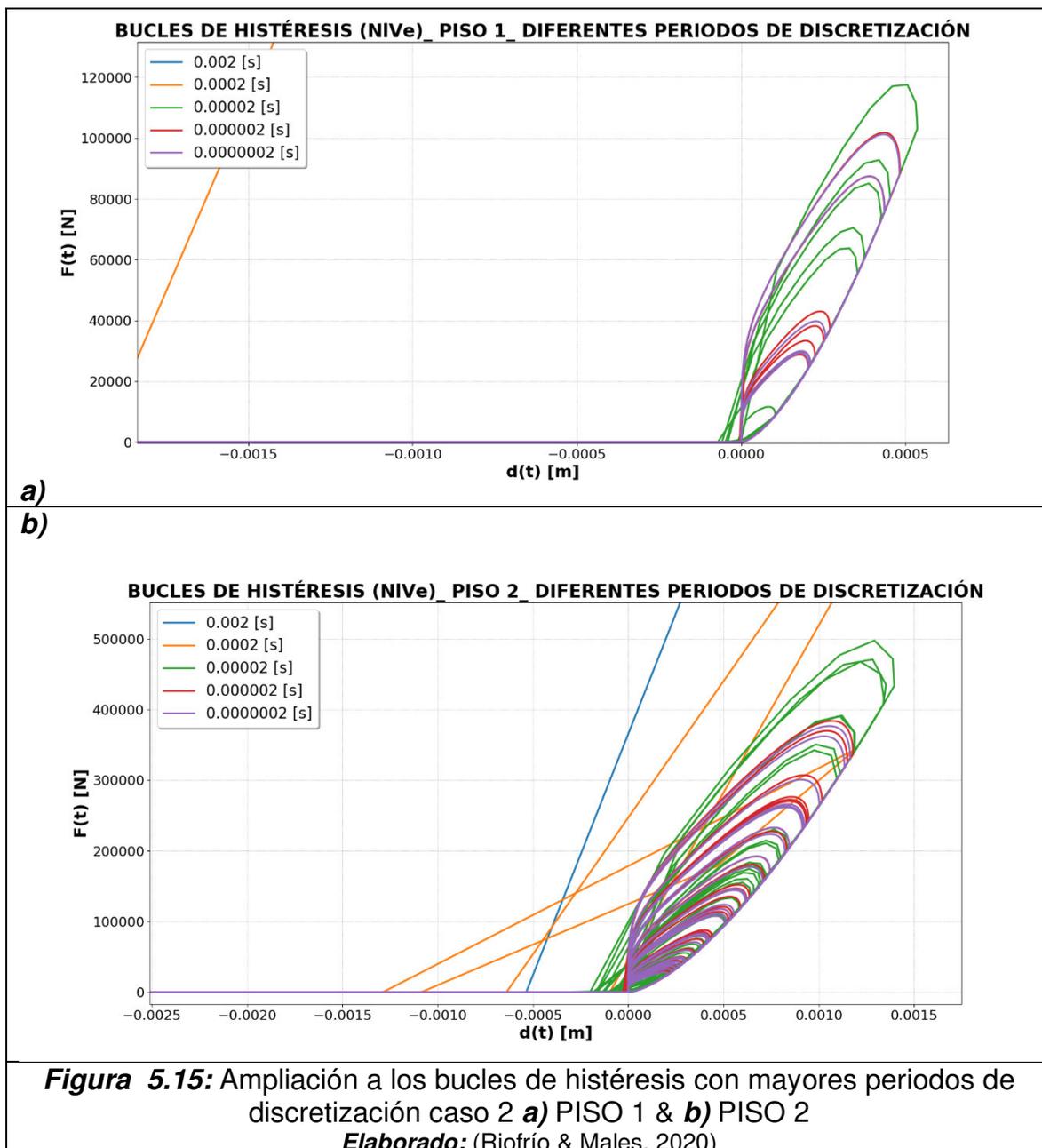
Con el propósito de determinar la energía disipada durante el impacto entre estructuras se realiza lasos de histéresis que relacionan la fuerza de impacto con el desplazamiento relativo $\delta(t)$. El área encerrada dentro de los bucles equivale a la energía disipada. (Khatami et al., 2019).

Por cada fuerza de choque existe su correspondiente curva de histéresis (ver Figura 5.14 a & b), en este código no se alcanzó una formulación para evaluar el área dentro de las curvas, por lo que si se desea saber el valor se lo puede realizar mediante una evaluación gráfica de con una herramienta como AutoCAD.



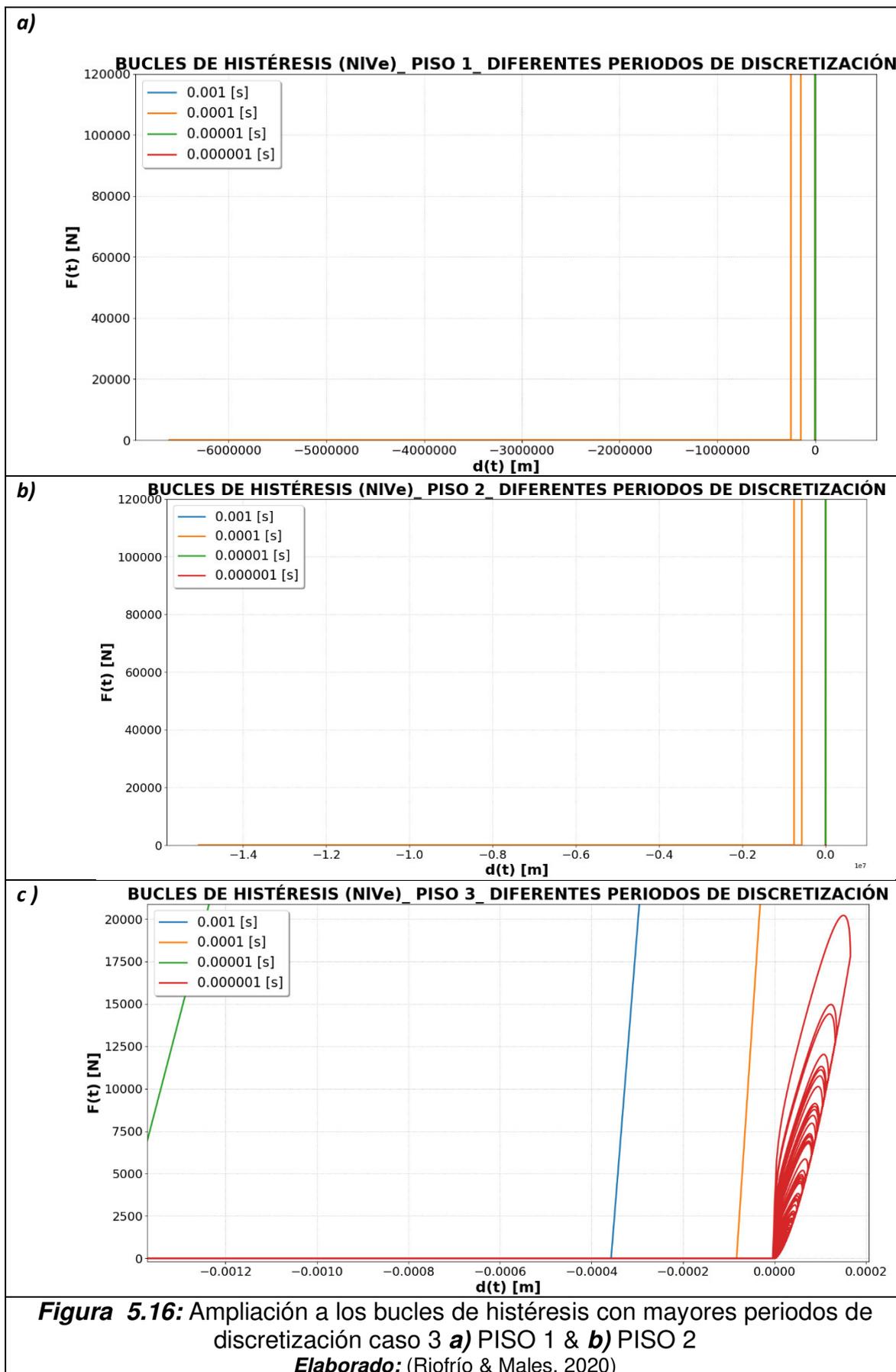
5.1.3.2 Caso 2

En este caso en ambos pisos existen bucles de histéresis ya que en ambos pisos existe fuerzas de colisión. (ver Figura 5.15. a & b).



5.1.3.3 Caso 3

En este caso solo existe bucles de histéresis en el tercer piso ya que solo en este piso se generaron fuerzas de colisión, por lo tanto, se podría pensar que en los pisos 1 y 2 no existe pérdida de energía. Sin embargo, esto no puede suceder ya que siempre existe transformación y perdida de energía. (ver Figura 5.16).



5.2. RESULTADOS DE ETABS

5.2.1 RESPUESTA DINÁMICA CON Y SIN FUERZAS DE CHOQUE

En la figura 5.17 y 5.18 se observa la modificación de los desplazamientos a causa de la implementación del elemento gap.

Se aclara que los resultados en ETABS para esta sección los análisis son en el rango lineal para $n_pasos=4'000'000$; $T_discretizacion=0.00001$.

5.2.1.1 Cantiliver

Para este modelo no se observa mayor modificación con respecto a un modelo con $n_pasos=4000$ a pesar que se asignado una fuerza 85 veces mayor (ver Tabla 5.7).

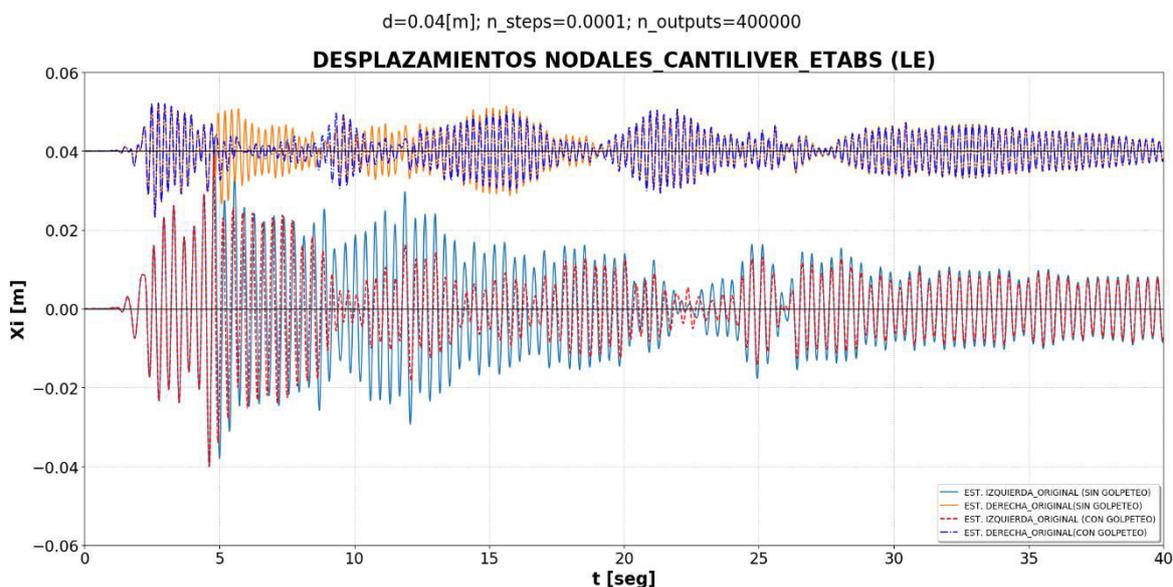


Figura 5.17: Desplazamientos nodales CANTILIVER
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.2.1.2 Pórtico Espacial (Caso 1)

Para este modelo con las condiciones ya mencionadas cuando aparece la primera fuerza de colisión el análisis se detiene y los desplazamientos nodales solo se registran en ese punto (ver Figura 5.18).

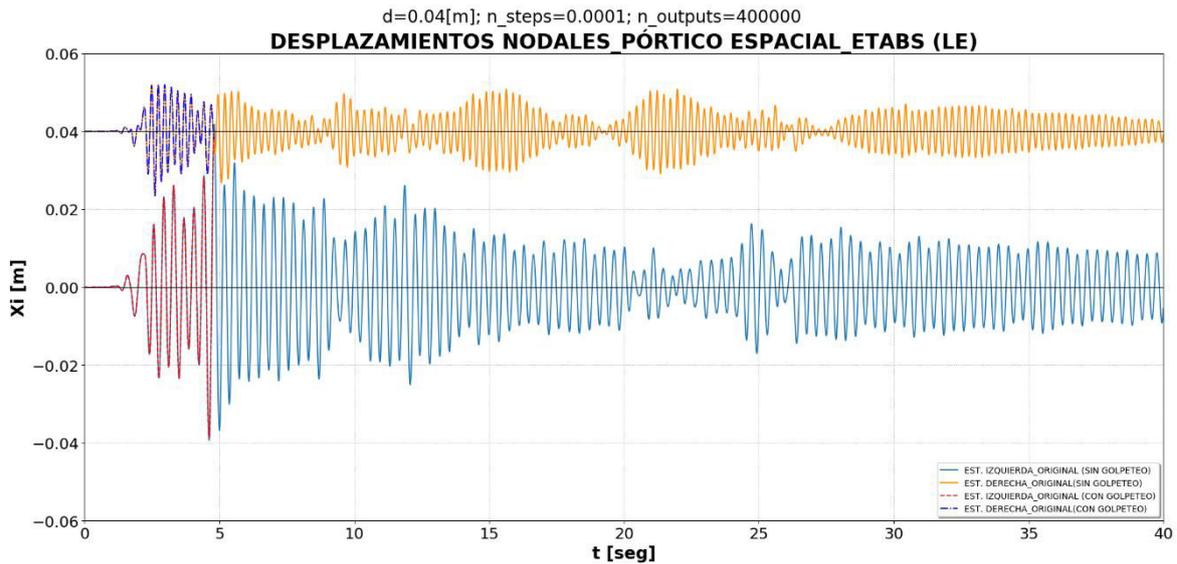


Figura 5.18: Desplazamientos nodales PÓRTICO ESPACIAL Caso A
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.2.2 FUERZAS DE COLISIÓN CON DIFERENTES PERÍODOS DE DISCRETIZACIÓN

Con la ayuda de los Gaps se logra obtener fuerzas de colisión y para cada caso de estudio, se analizó con diferentes intervalos de tiempo también llamados periodos de discretización lo que puede generar cambios significativos (ver Figura 5.19 & 5.20).

5.2.2.1 Cantiliver

En este caso para todos los periodos de discretización se obtuvo una sola fuerza de colisión durante todo el evento sísmico (ver Figura 5.19 a) y a medida que los periodos de discretización aumentan las fuerzas de colisión también (ver Figura 5.19 b), las magnitudes y tiempos están resumidas en la Tabla 5.7.

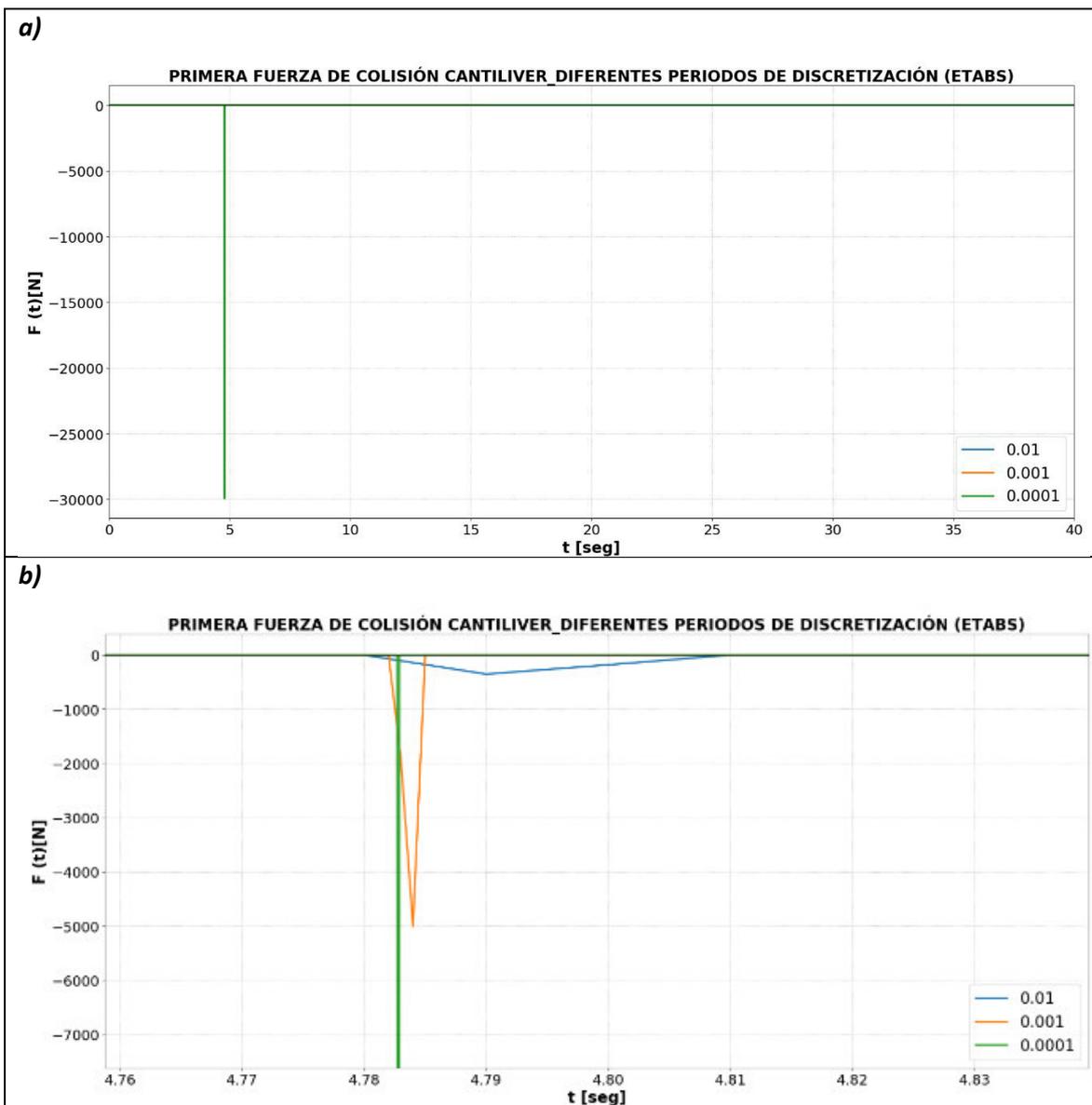


Figura 5.19: Fuerzas de colisión CANTILIVER
a) Todo el evento sísmico & **b)** Acercamiento a la primera fuerza de colisión.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Tabla 5.7:

Fuerza de colisión variando los periodos de discretización CANTILIVER

tiempo_	tasa_	n_	costo_	F_N	Fgap_primer impacto		Error
analizado	muestreo		computacional	choques			
[seg]		pasos	[min]	1er piso	[N]	seg	[%]
40	0.01	4.00E+03	3	1	352.89	4.8 a 4.81	
40	1.00E-03	4.00E+04	7	1	5010.35	4.784 a 4.785	1319.81
40	1.00E-04	4.00E+05	40	1	29938.09	4.7829	497.52

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.2.2.2 Pórtico Espacial (Caso 1)

En este caso no se observa el mismo patrón que en el anterior caso al aumentar los periodos de discretización (ver Figura 5.20 b), lo cual no es coherente con lo que sugiere la bibliografía de (Kharazian & Almansa, 2017), las magnitudes y los tiempos en los que suceden las fuerzas de colisión están resumidas en la Tabla 5.8.

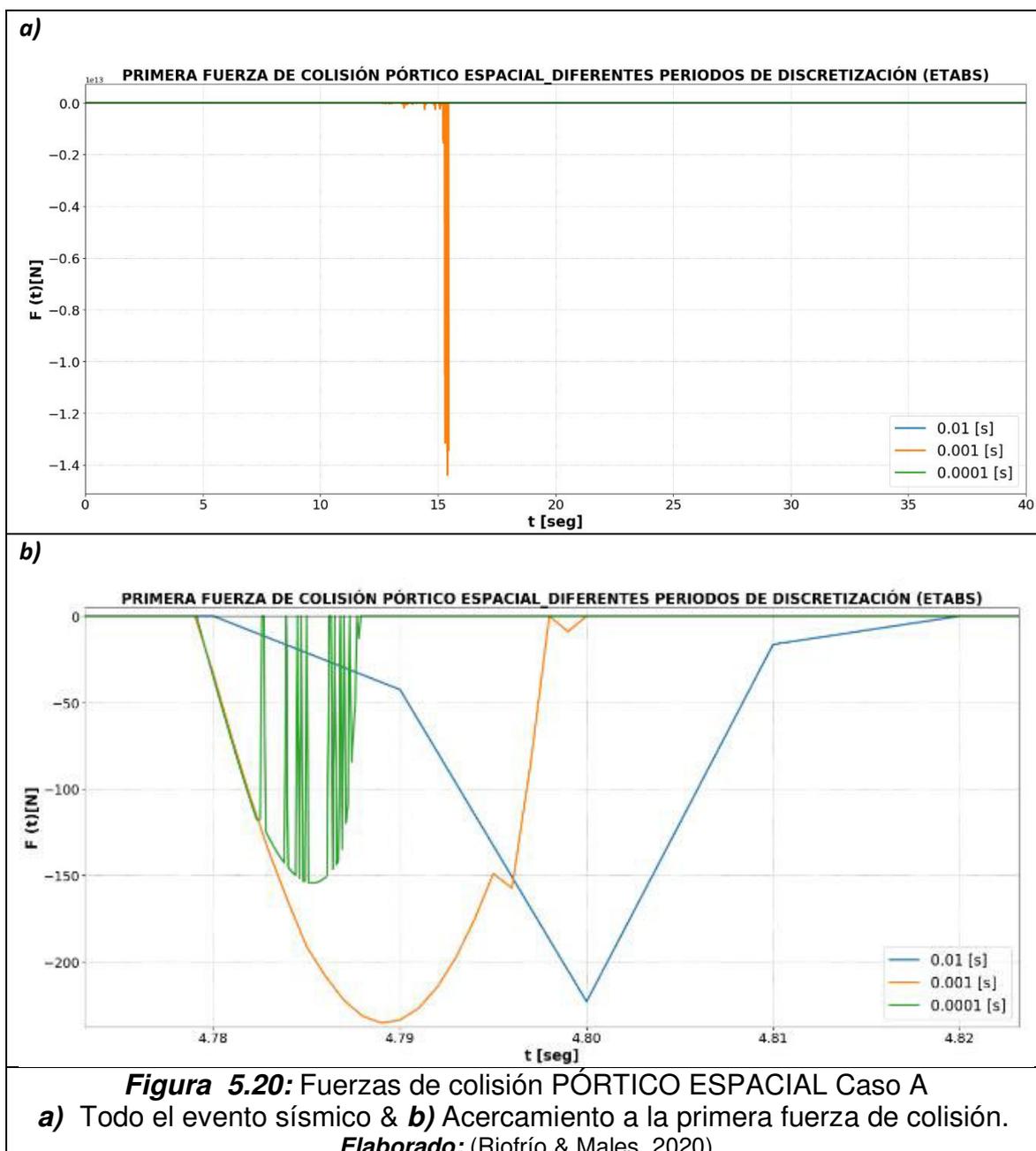


Tabla 5.8:

Fuerza de colisión variando los periodos de discretización PÓRTICO ESPACIAL
Caso A

tiempo_ analizado	tasa_muestreo	n_pasos	costo_computacional	F_N choques 1er piso	Fgap_primer impacto		Error	Fgap_max		Error
					[N]	seg		(1er piso)	tiempo	
[seg]			[min]		[N]	seg	[%]	[N]	[seg]	[%]
40	0.01	4.00E+03	5	1	223.13	4.8 a 4.82		223.13	4.8 a 4.82	
40	1.00E-03	4.00E+04	12	33	235.4	4.781 a 4.798	5.50	1.44E+13	15.396 a 15.397	>100
40	1.00E-04	4.00E+05	50	1	118.16	4.7792 a 4.7825	49.80	118.16	4.7796 a 4.7825	100.00

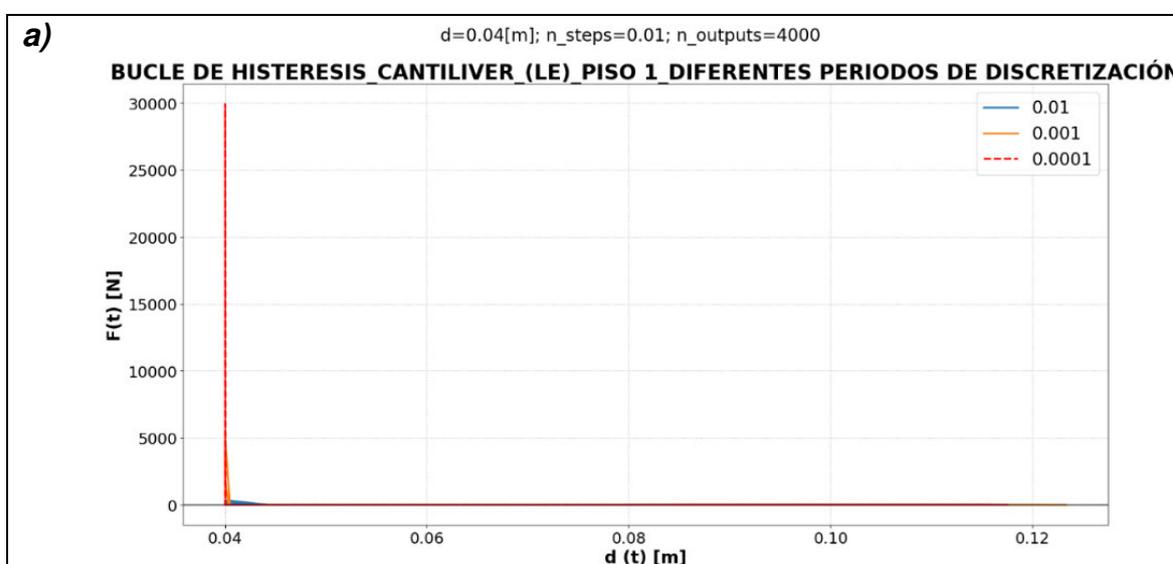
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.2.3 BUCLES DE HISTÉRESIS (ENERGÍA DISIPADA)

Con el propósito de determinar la energía disipada durante el impacto entre estructuras se realiza lasos de histéresis que relacionan la fuerza de impacto con el desplazamiento relativa $\delta(t)$. El área encerrada dentro de los bucles equivale a la energía disipada. (Khatami et al., 2019).

Al realizar los bucles no se encontró bucles como los que se hace referencia en la bibliografía (Jankowski, 2010) (ver Figura 5.21 & 5.22) y los que se puede conseguir mediante el código (*Dynamic_WITH_Pounding_NIVe*) de OpenSees.

5.2.3.1 Cantiliver



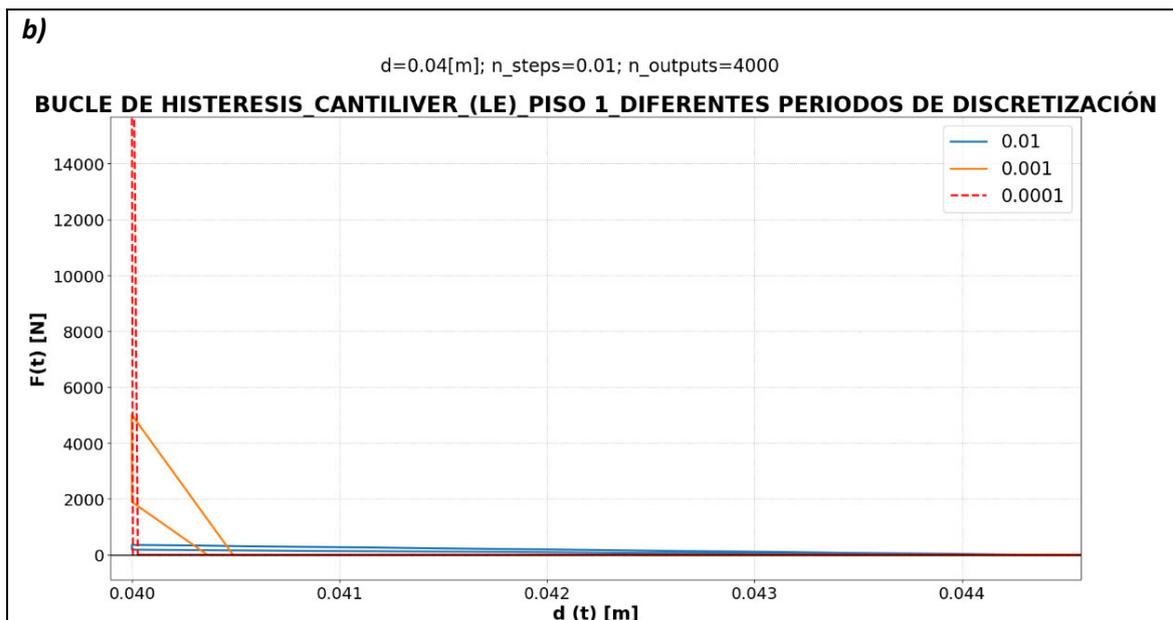
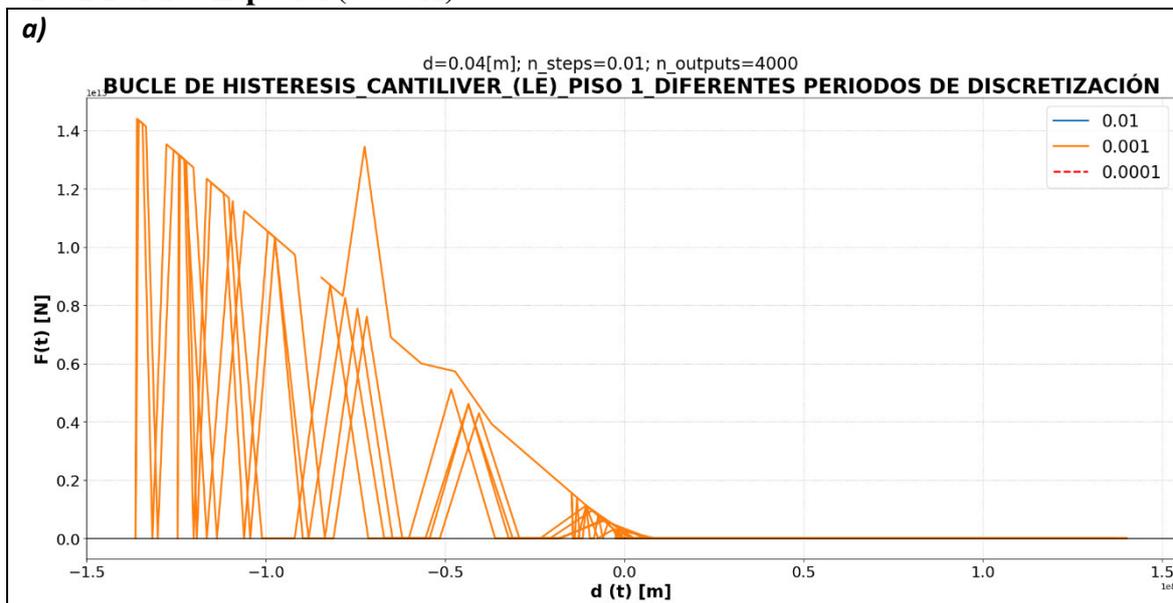


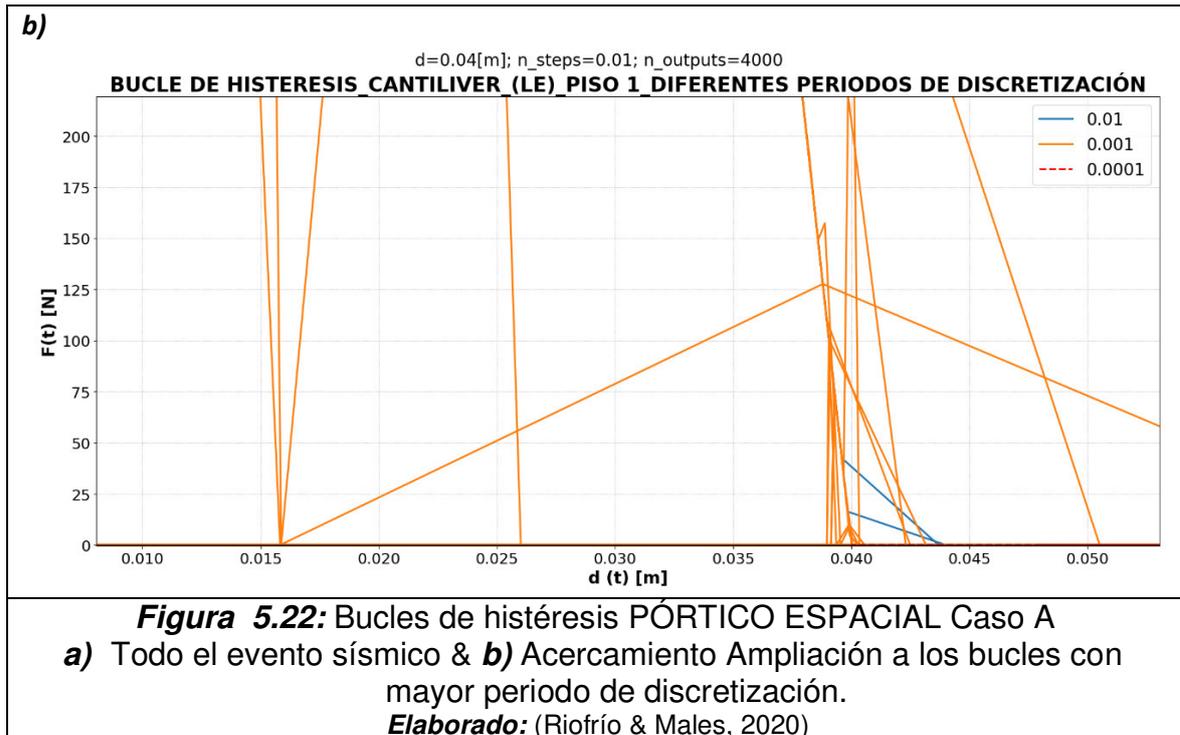
Figura 5.21: Bucles de histéresis CANTILIVER

a) Todo el evento sísmico & **b)** Acercamiento Ampliación a los bucles con mayor periodo de discretización.

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.2.3.2 Pórtico Espacial (Caso A)





5.3. EVALUACIÓN ELEMENTO “GAP” DE ETABS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al implementar el elemento gap en el modelo equivalente Cantiliver y en el pórtico 3D. Los resultados se han dividido en 2 grupos en la primera parte se analiza el cantiliver con los valores de rigidez de la ecuación (4.1) y (4.2). La segunda parte presenta los resultados del pórtico 3D al ser analizado con la ecuación de rigidez (4.1) y (4.2). A su vez a estos valores de rigidez han sido analizados con diferentes ubicaciones del elemento gap.

Estas variaciones nos permitirán identificar por una parte si el comportamiento del elemento gap varía al colocarlo en una posición u otra. Además, se puede comprobar si el uso de más de un elemento gap influye en la respuesta de la estructura.

Se aclara que los resultados en ETABS de esta sección, los análisis son en el rango lineal para $n_{pasos}=4000$; $T_{discretizacion}=0.01$.

5.3.1 EVALUACIÓN EN CANTILIVER VARIANDO LA RIGIDEZ DE COLISIÓN

En la figura (5.23) se observa la representación del sistema equivalente propuesto. El elemento “gap” se ha colocado en el punto más probable donde exista golpeteo.

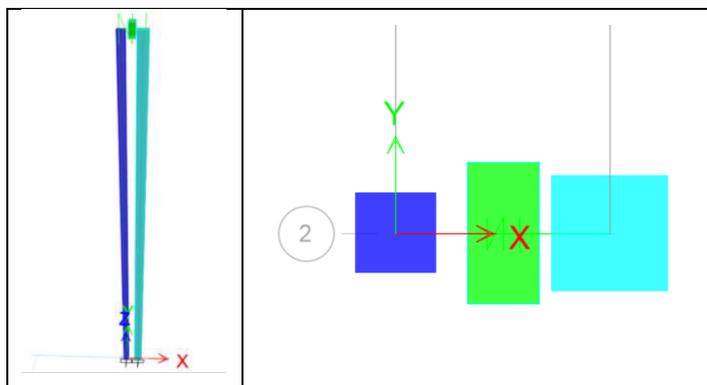


Figura 5.23: Sistema equivalente (Cantiliver) ETABS
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.3.1.1. Evaluación con rigidez de colisión calculada con Ec.1.

En la figura (5.24), al superponer los desplazamientos nodales del cantiliver para los 4 valores de rigidez calculadas con la ecuación (4.1). Se observa que la amplitud del desplazamiento varía tanto para la estructura izquierda como derecha.

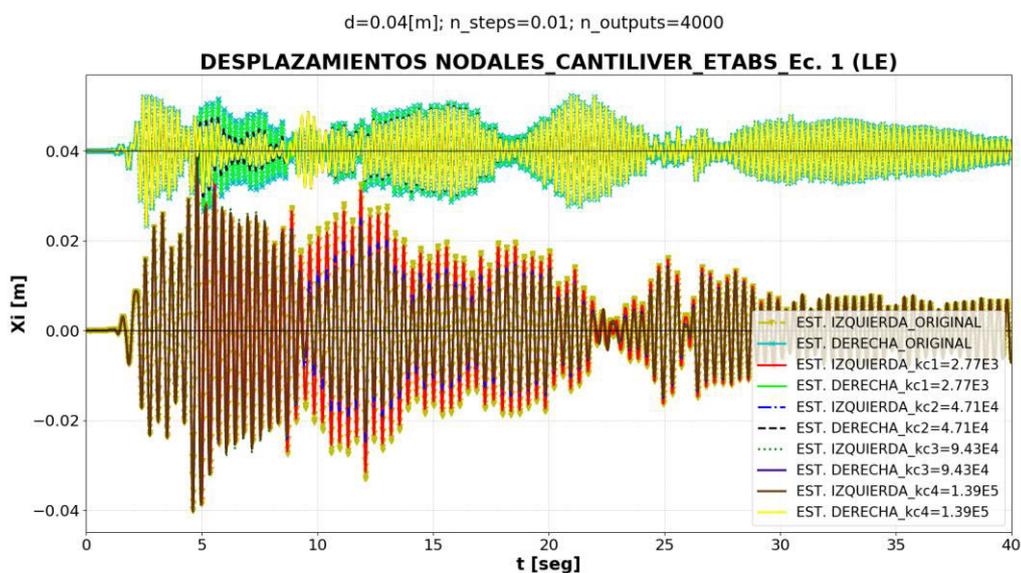


Figura 5.24: Superposición de desplazamientos nodales ec. 1.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

No existe variaciones en los desplazamientos nodales en la zona de certeza para los 4 valores de rigidez seleccionados como se observa en la figura (5.25).

En la figura (5.25) se observa que para todos los casos el primer impacto empieza en el mismo instante de tiempo. La penetración relativa disminuye a medida que la rigidez aumenta. En consecuencia, a menor área de penetración relativa el punto de inflexión después del primer golpe en la estructura izquierda se presenta antes que en la estructura sin elemento gap. En los casos de rigidez kc2, kc3 y kc4 el segundo impacto no ocurre. Mientras que con el valor de kc1 los 2 golpes ocurren.

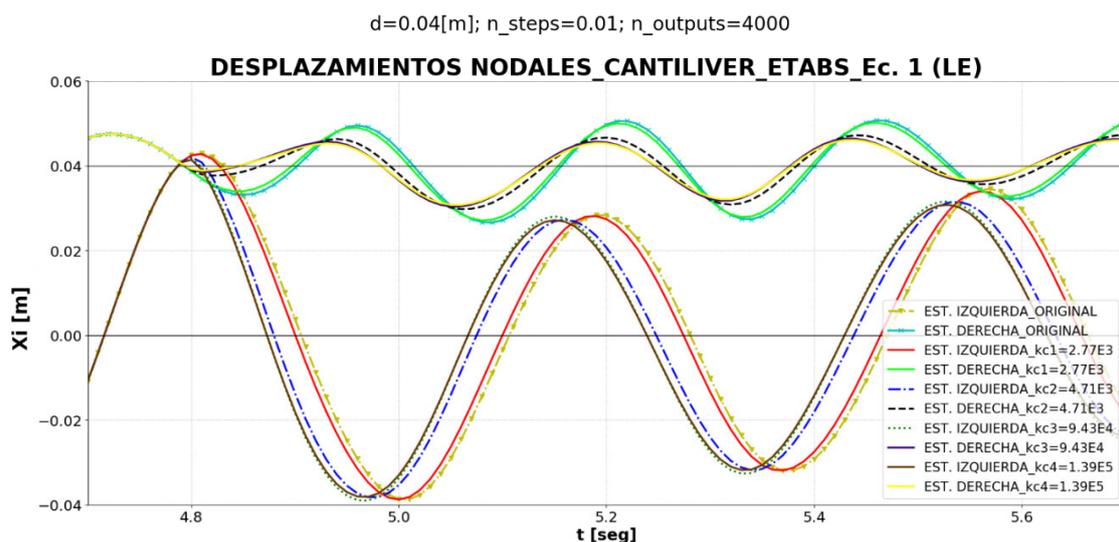


Figura 5.25: Zona de interés
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.3.1.2. Evaluación con rigidez de colisión calculada con Ec.2., y rigidez propuesta por (Jankowski,2010).

En la figura (5.26) al superponer los desplazamientos nodales del cantiliver para los 3 valores de rigidez de la ecuación (4.2) y el valor de rigidez ke2(Jankowski,2010). Estos aumentos en la amplitud del desplazamiento se presentan para los valores de rigidez ke1 y ke3. Con estos valores de rigidez se observa un comportamiento muy diferente después del primer impacto

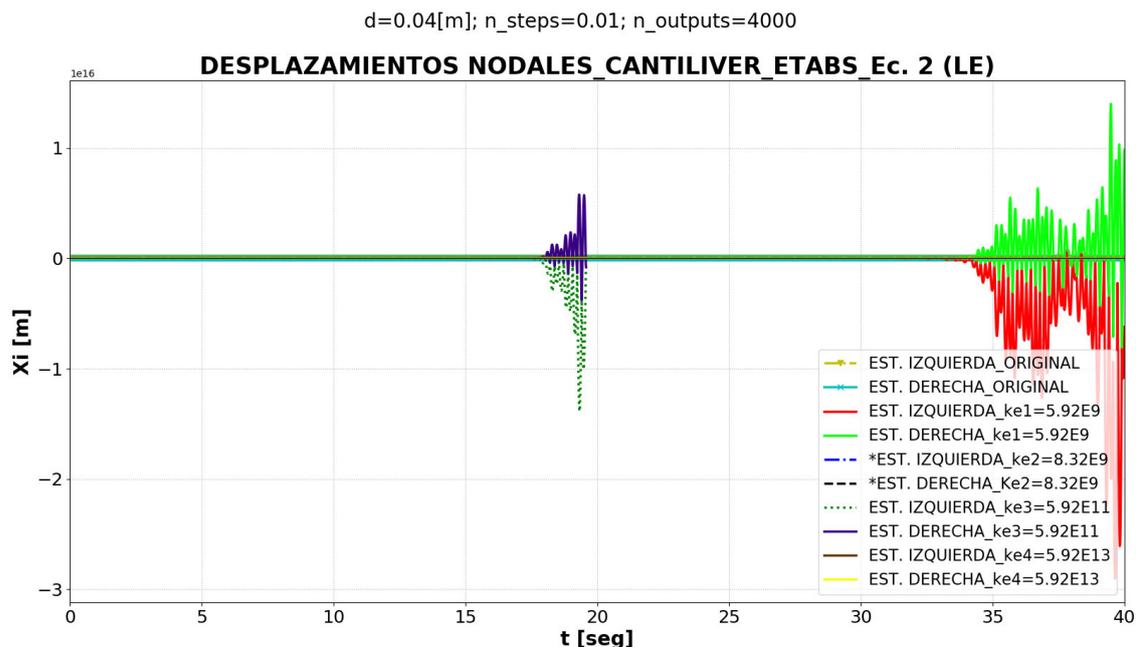


Figura 5.26: Superposición de desplazamientos nodales ec. 2.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

En la zona de certeza antes del primer golpe no se observan alteraciones en los desplazamientos nodales. En la figura (5.27) se observa que para ninguna rigidez existe alguna alteración.

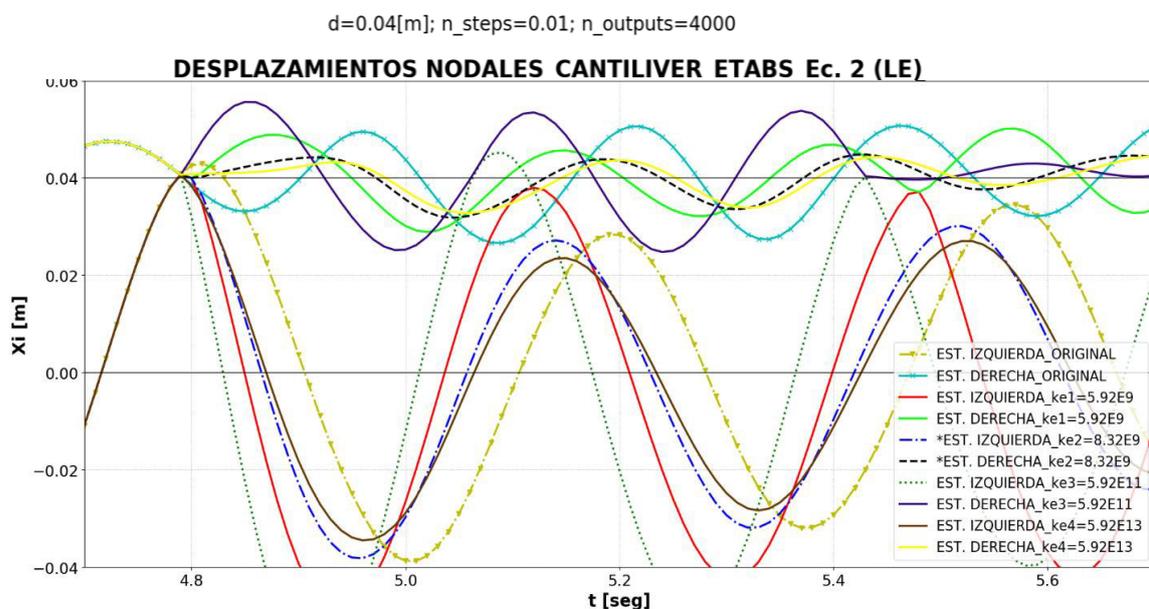


Figura 5.27: Zona de interés
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

En la figura (5.27), se observa en la zona del primer impacto que la penetración relativa para los valores de rigidez de la ecuación (4.2) deja de existir. Además, con

la rigidez ke_1 y ke_3 después del primer impacto aparecen impactos consecutivos. La rigidez propuesta por (Jankowski,2010) ke_2 , muestra un desplazamiento similar a la estructura original donde existe impacto. A diferencia de la rigidez ke_4 , a pesar de tener similitud en desplazamiento con la estructura original en este caso no existe el primer impacto. El primer punto de inflexión después del primer golpe presenta variaciones dependiendo del valor de rigidez, se esperaría que se retrase a medida que aumenta la rigidez, pero esto no se cumple en este caso.

5.3.2 EVALUACIÓN EN PÓRTICO ESPACIAL VARIANDO RIGIDEZ DE COLISIÓN, UBICACIÓN Y CANTIDAD DE GAPS.

5.3.2.1 Caso A: 1 Gap Intermedio

5.3.2.1.1 Ecuación 4.1

En el modelo 3D se evaluó el comportamiento del elemento gap en distintas ubicaciones. A su vez mirar que efecto tiene el valor de rigidez que se asigna al momento de obtener fuerzas. En la figura (5.28) se observa al pórtico 3D, con un solo elemento gap ubicado en el centro. Este elemento gap tomará los valores de rigidez de la ecuación (4.1) y (4.2).

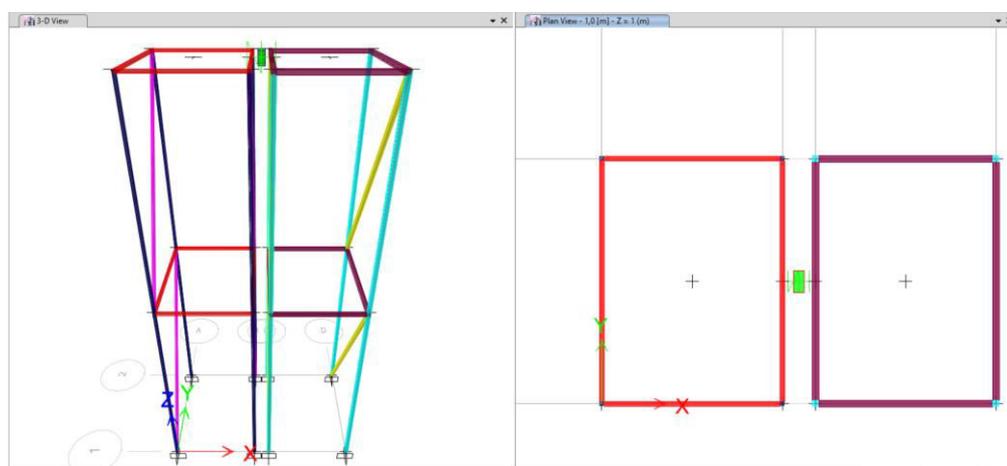


Figura 5.28: Pórtico espacial (ETABS)
Elaborado: (Ríofrío & Males, 2020)

En la figura (5.29) al superponer los desplazamientos nodales del pórtico espacial para los 4 valores de rigidez de la ecuación (4.1). Se observa que la

amplitud del desplazamiento en determinados puntos disminuye tanto para la estructura izquierda como derecha. No se observan desplazamientos atípicos.

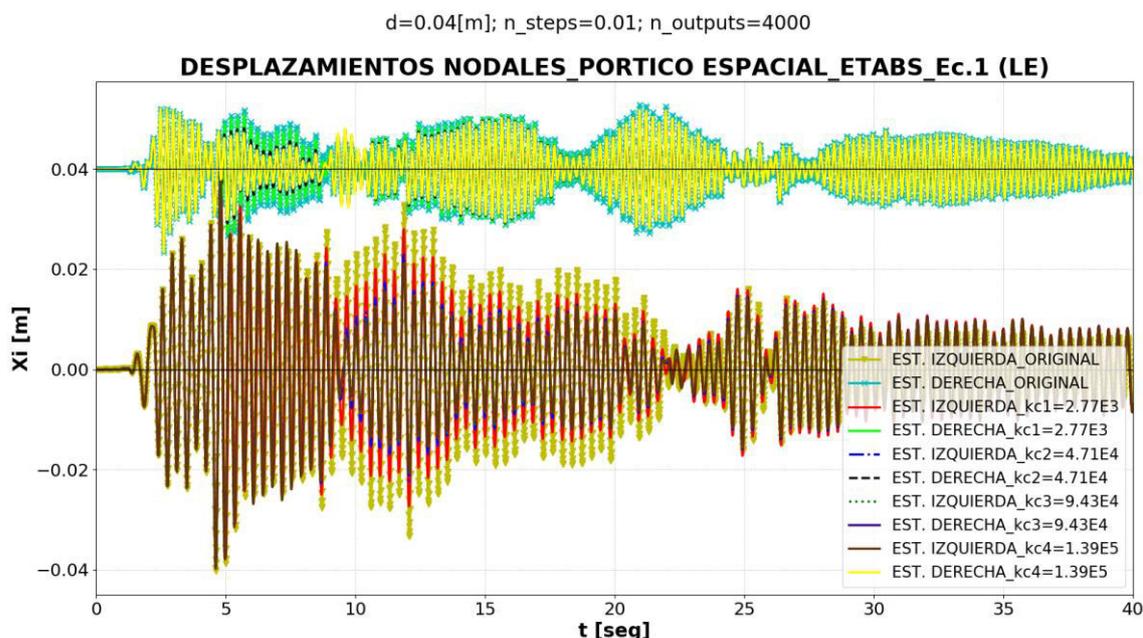


Figura 5.29: Superposición de desplazamientos nodales ec. 1.
 Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

En la zona de certeza se puede observar en la figura (5.30) que, para los cuatro valores de rigidez, el desplazamiento nodal se ve retrasado. En este caso se ve afectado el desplazamiento nodal antes del primer impacto.

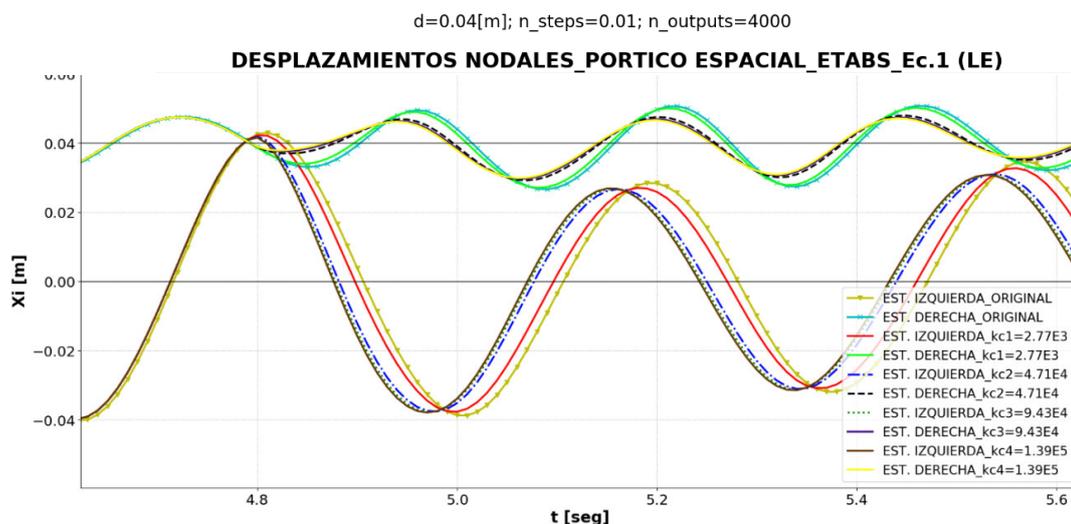


Figura 5.30: Zona de interés.
 Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

En todos los valores usados de rigidez obtenidos a partir de la ecuación (4.1), se observa en la figura (5.30) existe el primer impacto además de la penetración relativa que disminuye a medida que aumenta el valor de rigidez. El punto de

inflexión después del primer impacto se presenta antes a medida que la penetración relativa disminuye. Lo cual provoca que para ningún valor de rigidez exista un segundo impacto.

5.3.2.1.2 Ecuación 4.2

En la figura (5.32) al superponer los desplazamientos nodales del pórtico espacial para los 3 valores de rigidez de la ecuación (4.2) y el valor de rigidez ke_2 (Jankowski,2010). Se observa que para ke_1 y ke_2 los desplazamientos nodales no presentan desplazamientos atípicos, en estos 2 casos la amplitud de los 2 desplazamientos nodales disminuye tanto para la estructura izquierda y la estructura derecha.

Para los casos de ke_3 y ke_4 los desplazamientos nodales presentan desplazamientos atípicos. Las magnitudes de estos desplazamientos alcanzan valores 1^{12} . Además, se observa en la figura (5.31) estos desplazamientos nodales se detienen aproximadamente a los 7 [s]. De lo cual se podría suponer que el funcionamiento del elemento gap no es correcto.

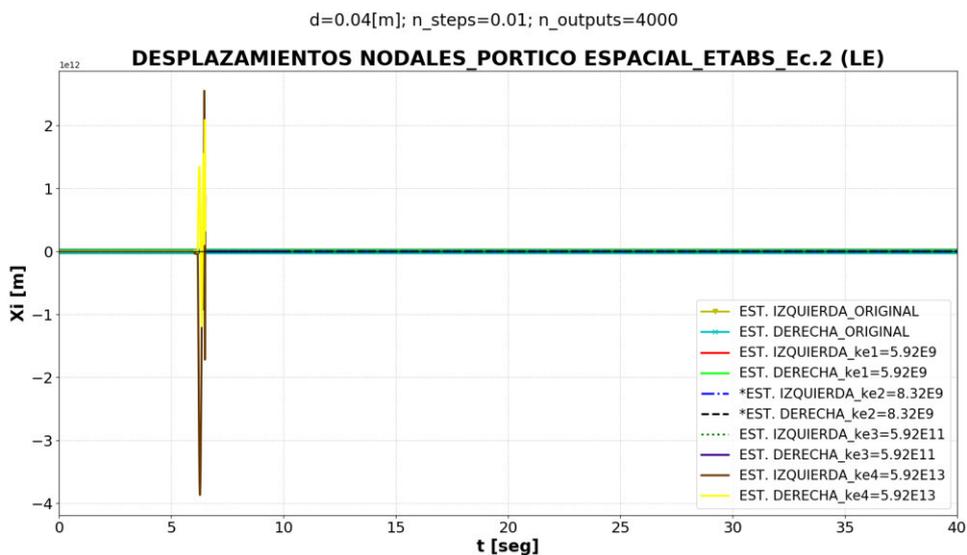


Figura 5.31: Superposición de desplazamientos nodales ec. 2.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

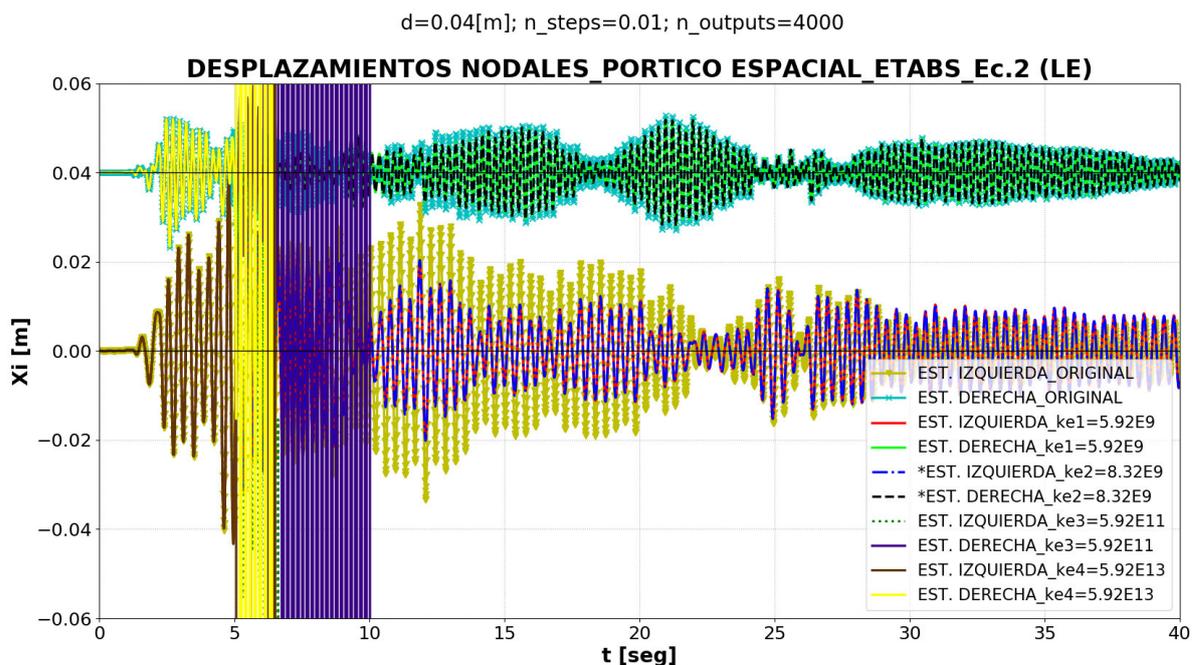


Figura 5.32: Superposición de desplazamientos nodales ec. 2.
 Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

En la zona de certeza se puede observar en la figura (5.33) que, para los cuatro valores de rigidez, el desplazamiento nodal se ve retrasado. En este caso se ve afectado el desplazamiento nodal antes del primer impacto.

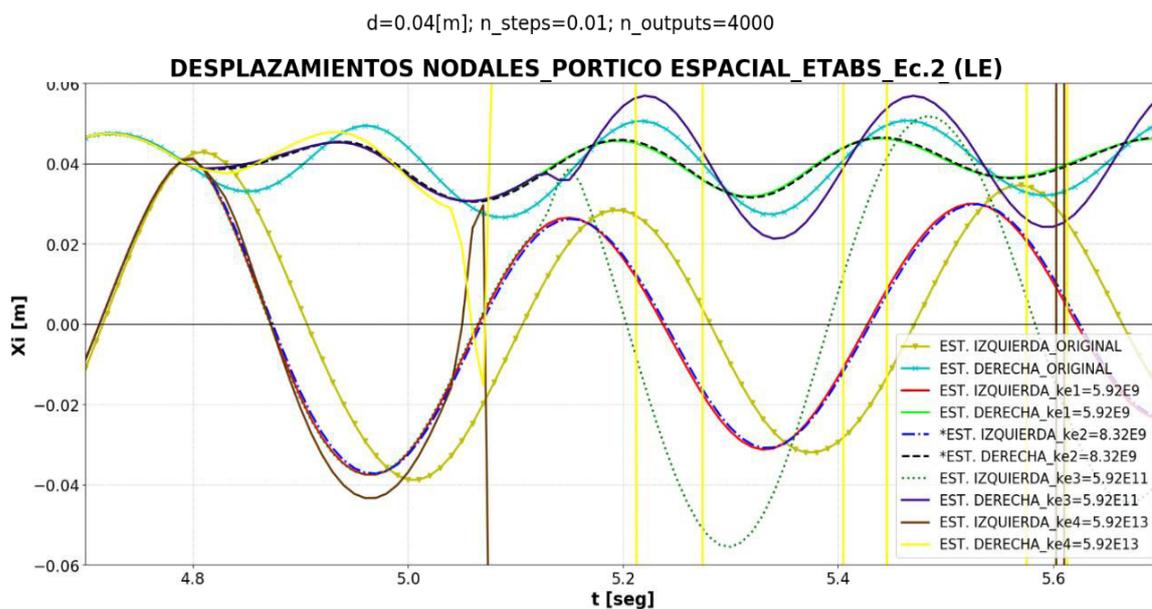


Figura 5.33: Zona de interés.
 Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

A pesar de existir un retraso en el desplazamiento nodal, en todos los valores de rigidez. El primer impacto ocurre en el mismo instante de tiempo. En cada uno de los casos existe penetración relativa, en este caso la penetración relativa no disminuye a medida que aumenta el valor de rigidez. Como se puede ver en la figura (5.33) el punto de inflexión después del primer golpe, se presenta en el mismo punto, pero cada vez más alejado del eje X. En los casos de ke_1 y ke_2 , no existe un 2º impacto, mientras que con los valores de ke_3 y ke_4 existe más de un golpe después del primer impacto.

5.3.2.2 Caso B (1 Gap esquinero) y Caso C (2 Gap esquineros)

Nos hemos visto en la necesidad de analizar si colocar más de un elemento gap afecta la respuesta de las estructuras. Así mismo se desea saber si la posición donde son colocados los elementos gap influye.

Realizar estas variaciones son posibles, ya que todos los nodos están ubicados a 1 [m] de altura y si no existe torsión se activarían todos al mismo tiempo, tanto para la estructura izquierda como la derecha. En la figura (5.34) se ven las 2 variaciones elegidas.

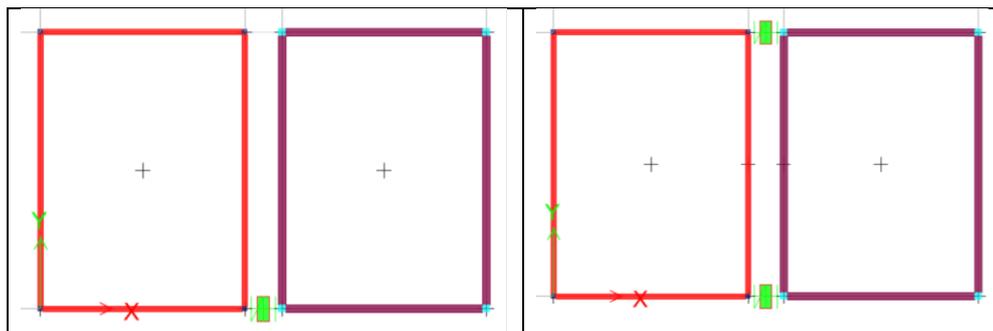


Figura 5.34: Pórtico espacial (ETABS)

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Como en los casos anteriores se usarán los valores obtenidos de la ecuación (4.1) y (4.2) para la rigidez del elemento gap. Además, el valor de rigidez de impacto propuesto por (Jankowski,2010).

5.3.2.2.1 Ecuación 4.1 y 4.2

Como se observa en la figura (5.35) correspondiente al caso (2) del pórtico espacial en ningún caso la amplitud del desplazamiento presenta valores

superiores a los que se obtienen de las estructuras originales sin elementos gaps incorporados. Este comportamiento es similar para el caso (3). Este comportamiento persiste aun usando valores de rigidez diferentes.

Debido a la similitud de los desplazamientos para los casos (2) y (3), el análisis se realizará únicamente para la respuesta en desplazamiento de la figura (5.35).

En la figura (5.36), al observar la zona de certeza se observa que los desplazamientos antes del primer impacto no son similares a la estructura original sin elemento gap. Este es un comportamiento no deseado que se observa. Al observar la zona del primer impacto se mira claramente que no existe el contacto para ningún caso de estudio donde se incorporó el elemento gap. Esta ausencia del primer impacto es un indicador de que tanto al variar la posición del elemento gap o su número el comportamiento de la estructura se ve afectada.

Y cualquier análisis posterior no es necesario, ya que no existirá impacto cosa que no es posible ya que los desplazamientos originales de la estructura muestran la existencia de impactos en 2 instantes.

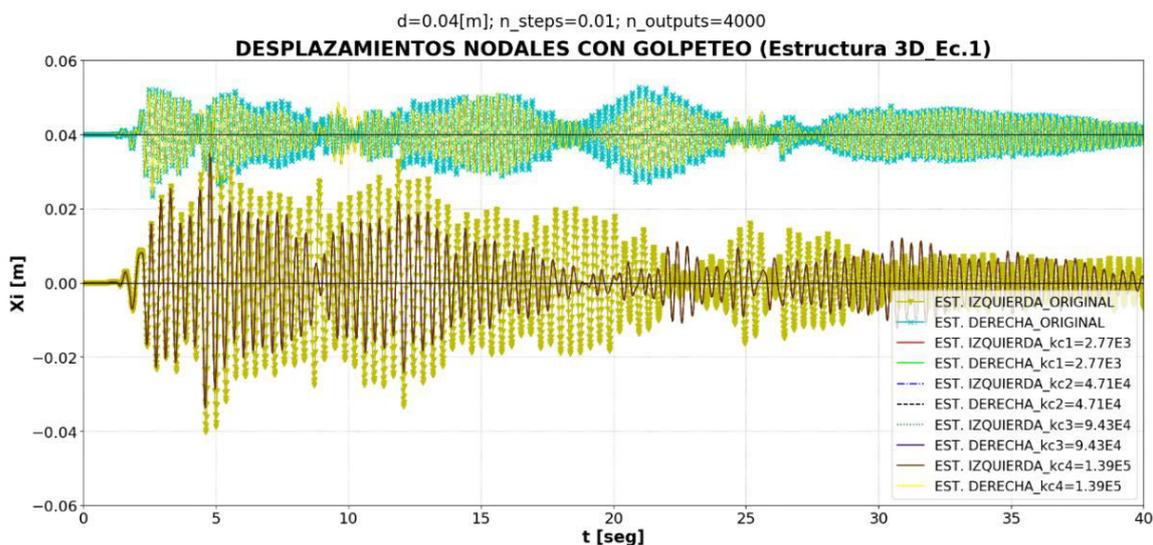


Figura 5.35: Pórtico espacial (ETABS)

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

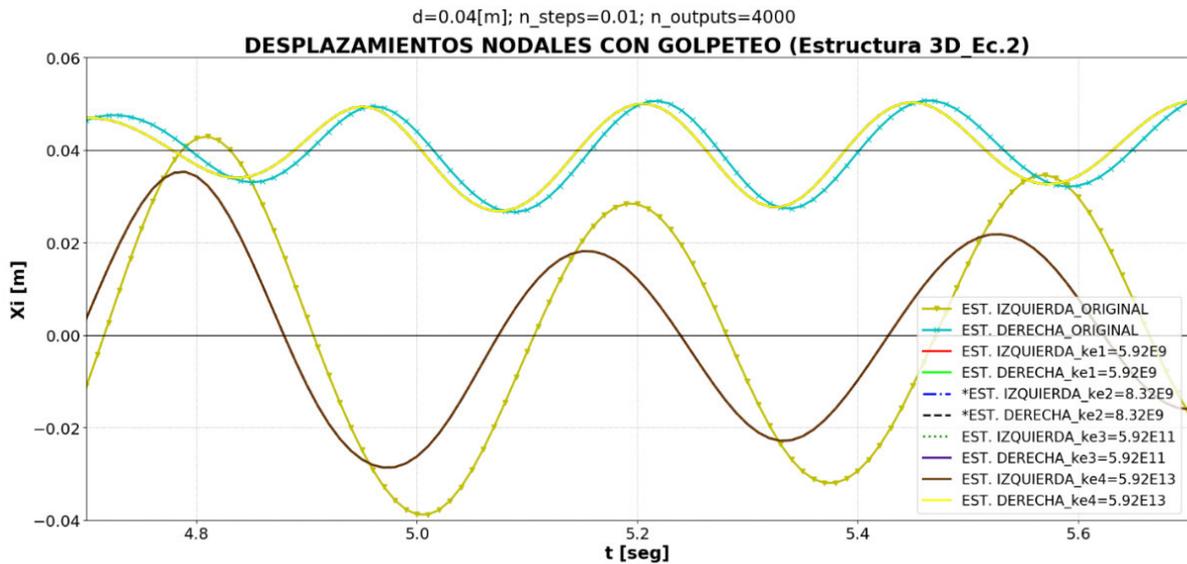


Figura 5.36: Pórtico espacial (ETABS)

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.3.3. FUERZAS DE COLISION VARIANDO LA RIGIDEZ DE COLISION.

A continuación, se muestran los casos donde el elemento gap genero fuerzas de colisión. Vale señalar que el obtener fuerzas de colisión no implica que el funcionamiento del elemento gap sea el correcto. Además, se señala que

5.3.3.1 Cantiliver

5.3.3.1.1 Ecuación 4.1

En la figura (5.37) están superpuestas las fuerzas que se obtienen de implementar el elemento gap con la rigidez obtenida de la ecuación (4.1). kc_1 es el único valor de rigidez que presenta 2 colisiones. Para los demás valores de rigidez existe una sola colisión. A medida que la rigidez aumenta la fuerza de colisión aumenta en magnitud. La particularidad aquí es la primera fuerza de colisión ya que todas inician en el mismo instante de tiempo.

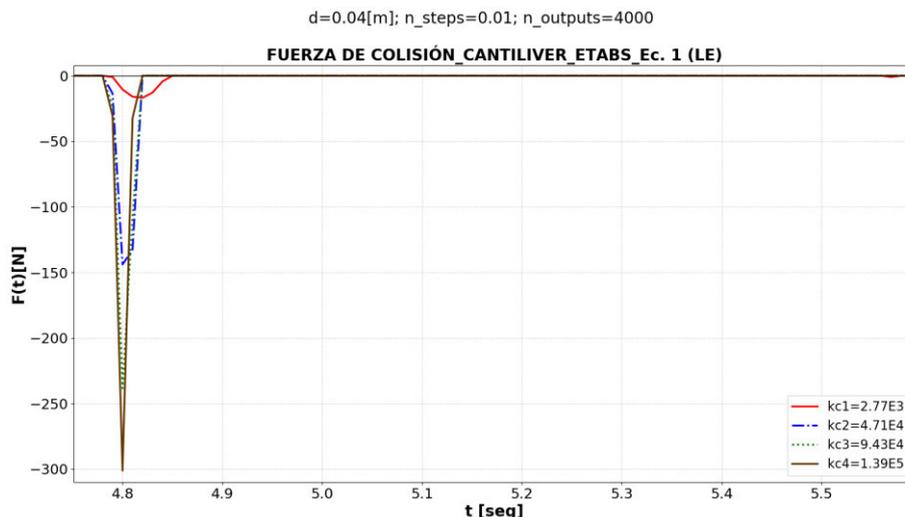


Figura 5.37: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 1.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.3.3.1.2 Ecuación 4.2

En la figura (5.38) están superpuestas las fuerzas que se obtienen de implementar el elemento gap con la rigidez obtenida de la ecuación (4.2) y la rigidez propuesta por (Jankowski,2010). En la figura se pueden ver que para la rigidez ke_1 y ke_3 , las magnitudes de las fuerzas alcanzan valores de 1^{20} . Estos valores son altos. Mientras que para la rigidez ke_4 no existen fuerzas de colisión y para la rigidez propuestas por (Jankowski,2010) existe una sola colisión como se observa en la figura (5.39).

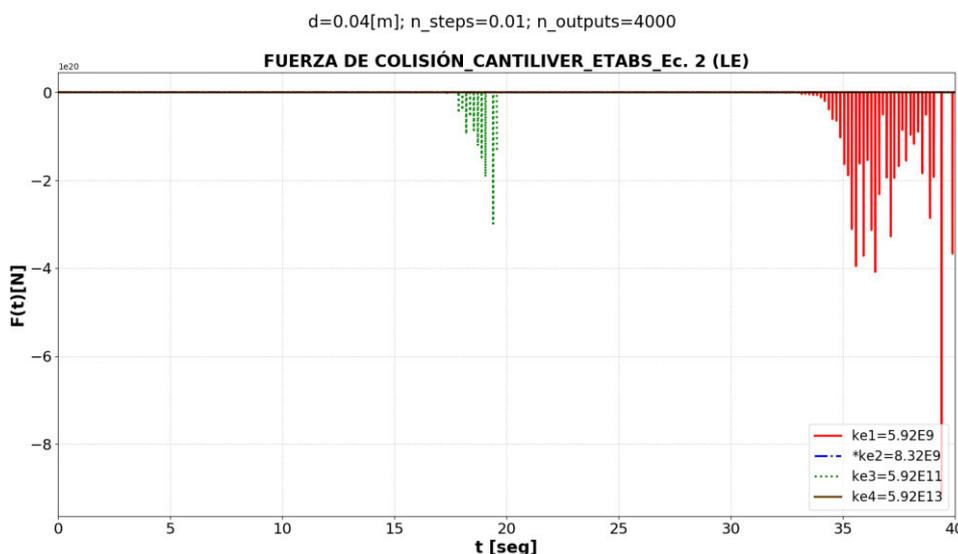


Figura 5.38: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 2.
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

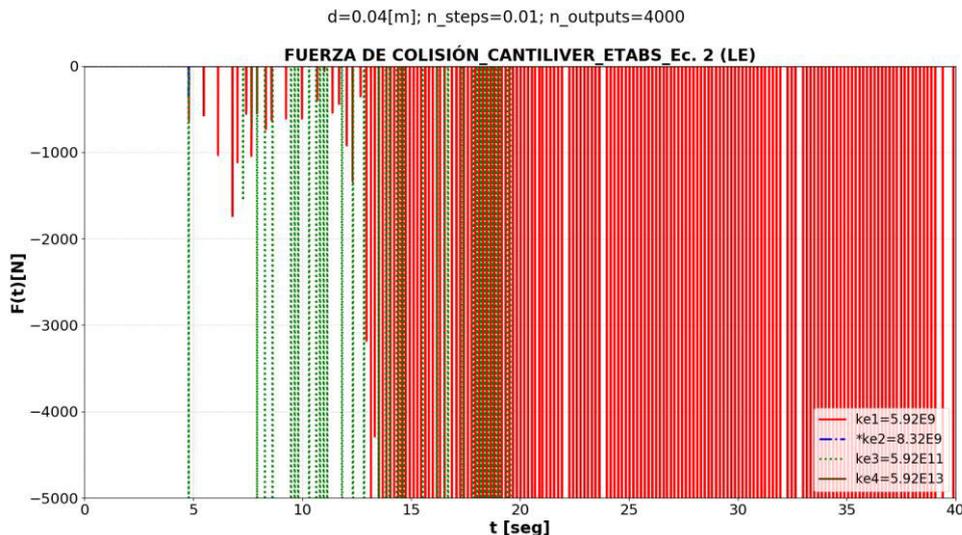


Figura 5.39: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 2.
 Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.3.3.2 Pórtico espacial Caso A

5.3.3.2.1 Ecuación 4.1

En la figura (5.40) están superpuestas las fuerzas que se obtienen de implementar el elemento gap con la rigidez obtenida de la ecuación (4.1). En este caso solo existe una fuerza de colisión contrario a lo que sucede en el caso cantiliver con la ecuación (4.1). Se observa en la figura (5.40) que a medida que aumenta la rigidez aumenta la magnitud de las fuerzas de colisión. Y el inicio de la colisión empieza en el mismo instante en todos los casos de rigidez.

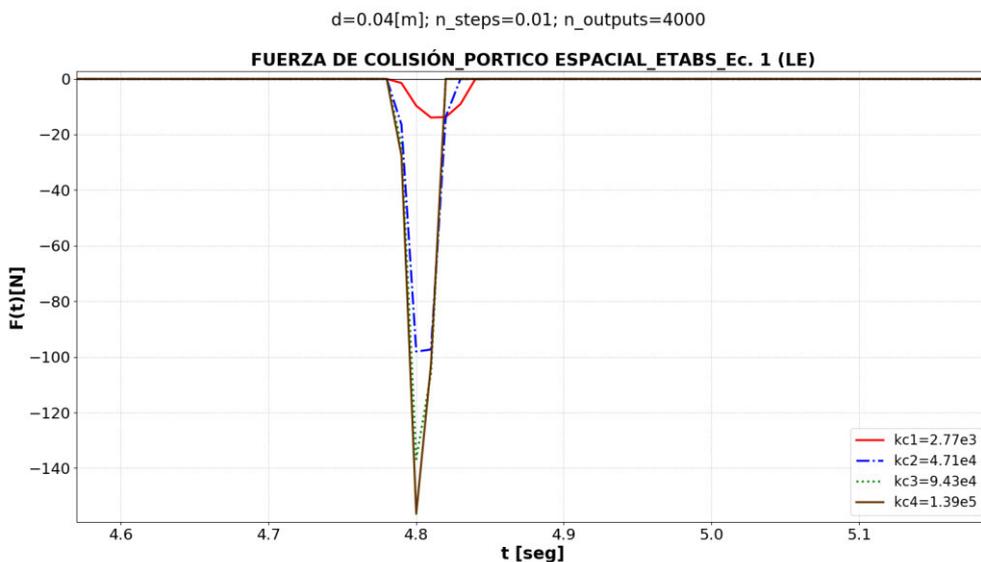


Figura 5.40: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 1.
 Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.3.3.2 Ecuación 4.2

En la figura (5.41) están superpuestas las fuerzas que se obtienen de implementar el elemento gap con la rigidez obtenida de la ecuación (4.2) y la rigidez propuesta por (Jankowski,2010). En la figura se puede ver que para la rigidez ke_3 y ke_4 , las magnitudes de las fuerzas alcanzan valores de 1^{11} y 1^{17} respectivamente. Se observa en la figura (5.41) que el inicio de la colisión empieza en el mismo instante para los casos de rigidez ke_1 , ke_2 y ke_4 .

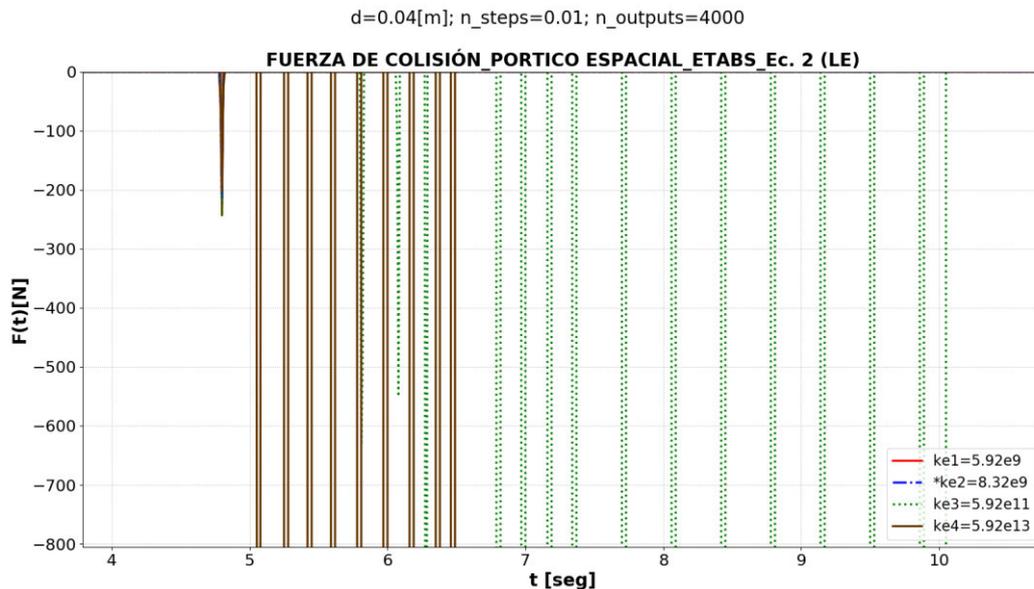


Figura 5.41: Fuerzas de colisión cantiliver ec. 2.

Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

Para los casos 2 y 3 de la estructura 3D. No existen fuerzas de colisión para ninguno de los casos.

5.4 COMPARACIONES OPENSEES Y ETABS DE MODELOS EN EL RANGO LINEAL.

Todas las comparaciones se las realiza para los modelos de cantiliver equivalente y pórtico espacial en rango lineal, utilizando los elementos gap de ETABS y los códigos de OpenSees (*Dynamic_WITH_Pounding_NIVE*) que responde al modelo viscoelástico no lineal; (*Dynamic_WITH_Pounding_LE*) que intenta simular la teoría usada en ETABS. Se mantuvo constante el espacio entre estructuras (d), el número de pasos (n_steps) y vario la rigidez de colisión calculadas a partir de las ecuaciones recomendadas en bibliografías.

Se aclara que los resultados en ETABS de esta sección, los análisis son en el rango lineal para $n_{\text{pasos}}=4000$; $T_{\text{discretizacion}}=0.01$.

5.4.1. USANDO $K_1=2.77E3$

La primera comparación se la realizo con el valor más bajo de rigidez de impacto calculada con la ecuación (4.1) (ver Figura 5.42), de la que se puede observar que se llega a tener valores similares entre ETABS y (*Dynamic_WITH_Pounding_LE*), por lo tanto, se podría pensar que el código simula la teoría de ETABS, sin embargo este es el único caso en el que sucede ya que para otros valores de rigidez más altos difieren los resultados como se muestra más adelante.

Además, se puede apreciar que con (*Dynamic_WITH_Pounding_NIVe*) se obtiene magnitudes de fuerza de colisión más pequeños en el Pórtico Espacial, pero todos los modelos suceden en el mismo instante con una duración de colisión muy parecida.

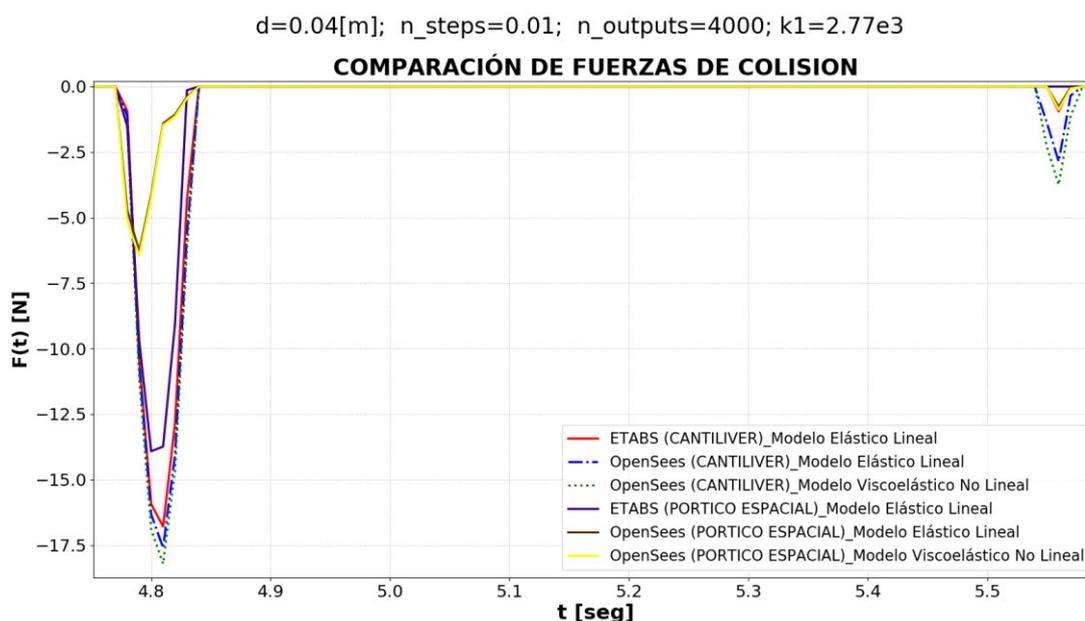
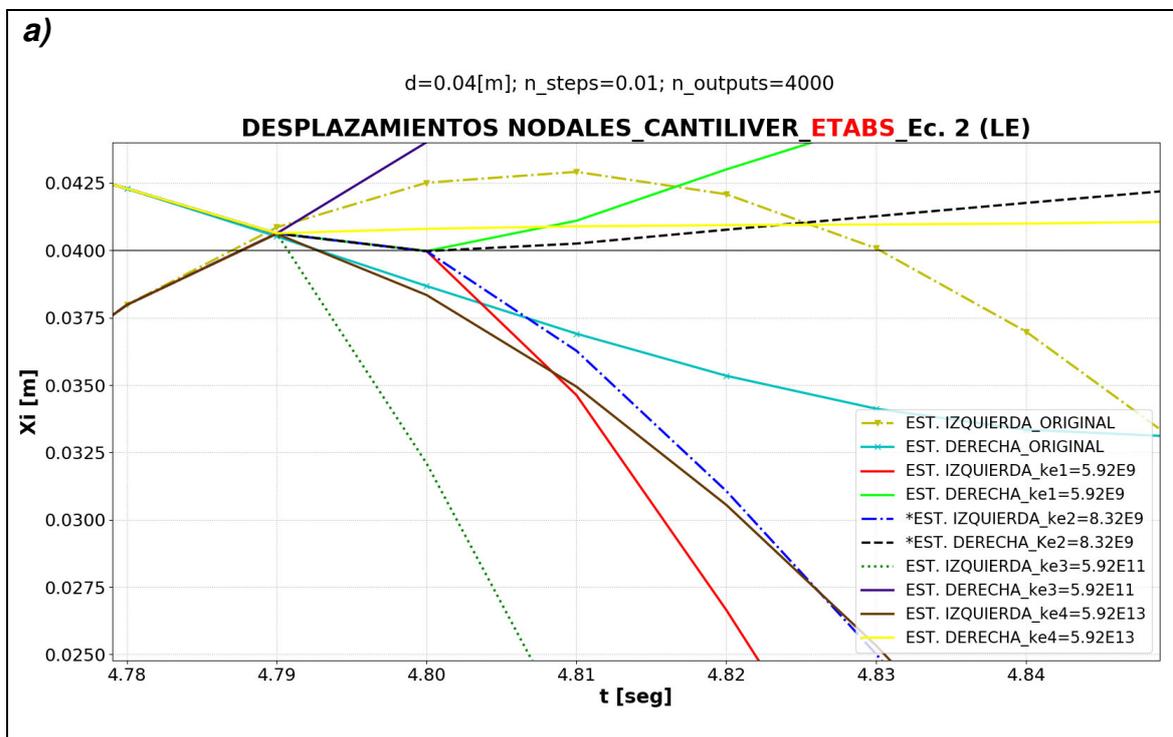


Figura 5.42: Comparación de fuerzas de colisión con $k_1=2.77e3$
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.4.2. VERIFICANDO $K > 2.77E3$ Y PATRONES DE INCONSISTENCIAS

5.4.2.1 Inconsistencias en la zona del primer impacto

Al evaluar un poco más a profundidad el elemento GAP de ETABS en cantiliver con rigideces calculadas con la ecuación (4.2) no se pudo observar patrones que sean deseables, de esta manera se puede destacar que para valores grandes de rigidez de colisión deja de existir la penetración relativa donde solo llegan a existir puntos comunes (ke_1 ; ke_2 & ke_3) y en otros deja de existir completamente el contacto (ke_4) (ver Figura 5.43 a). Mientras que en OpenSees siempre va a existir un primer punto de análisis y penetración relativa para los dos modelos analizados (ver Figura 5.43 b & c).



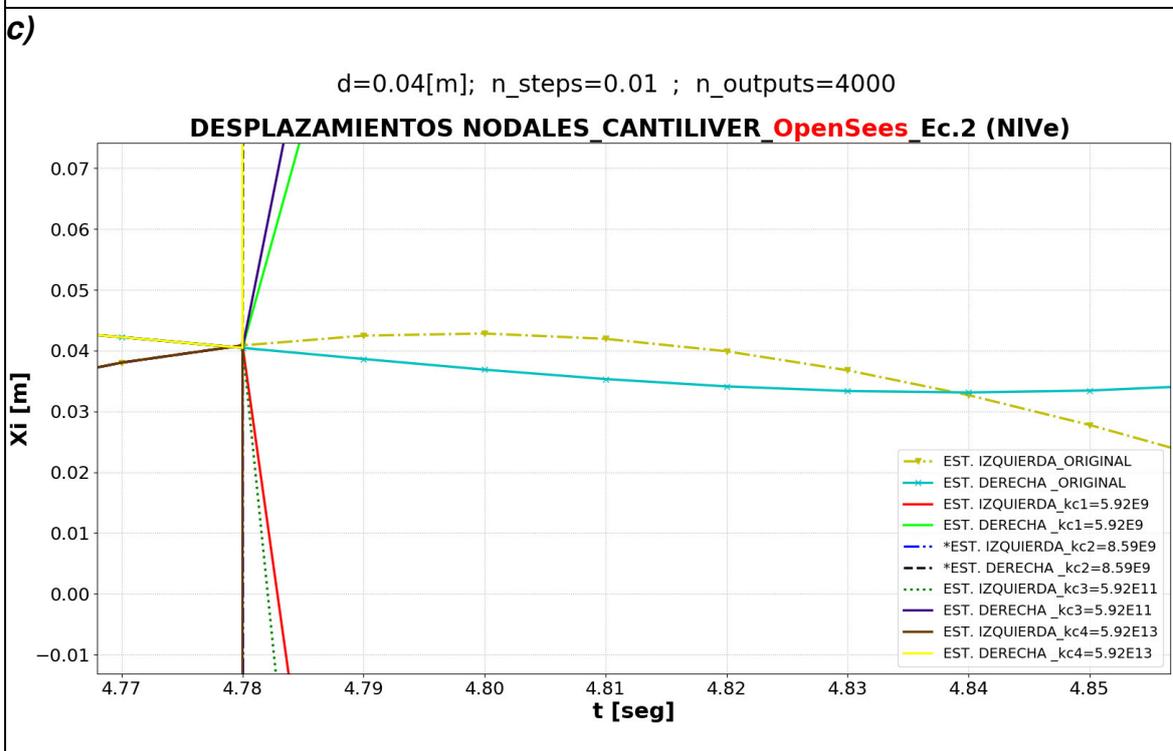
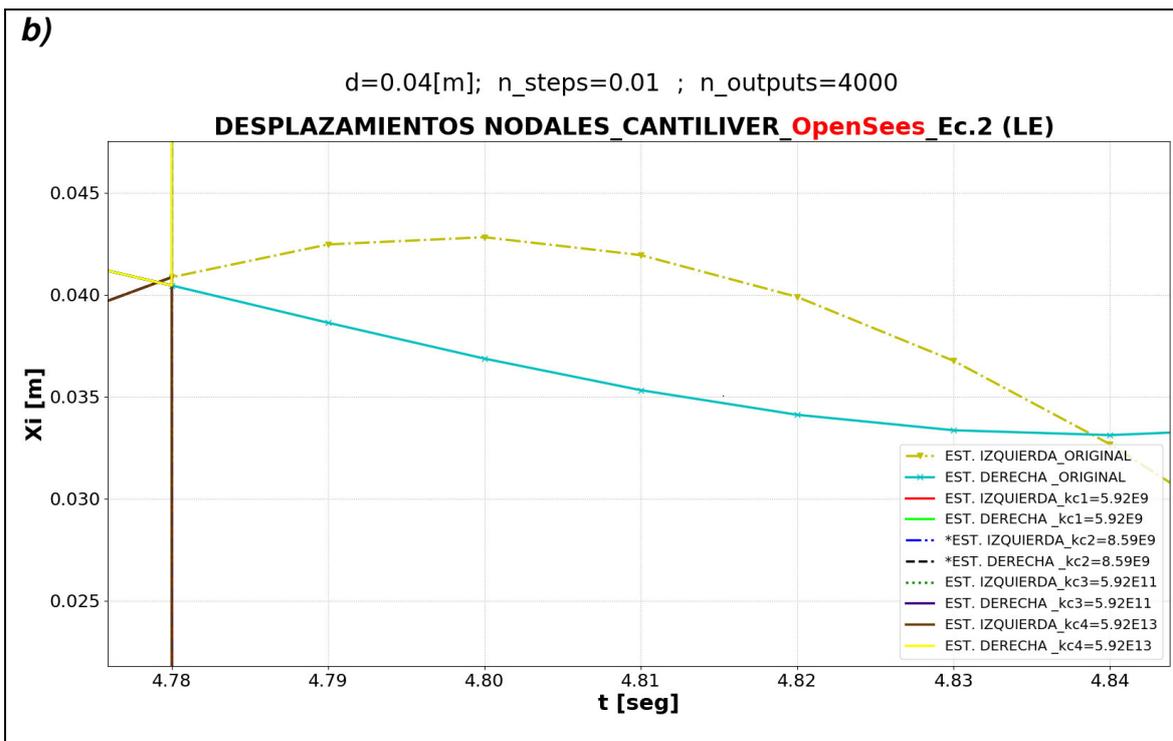


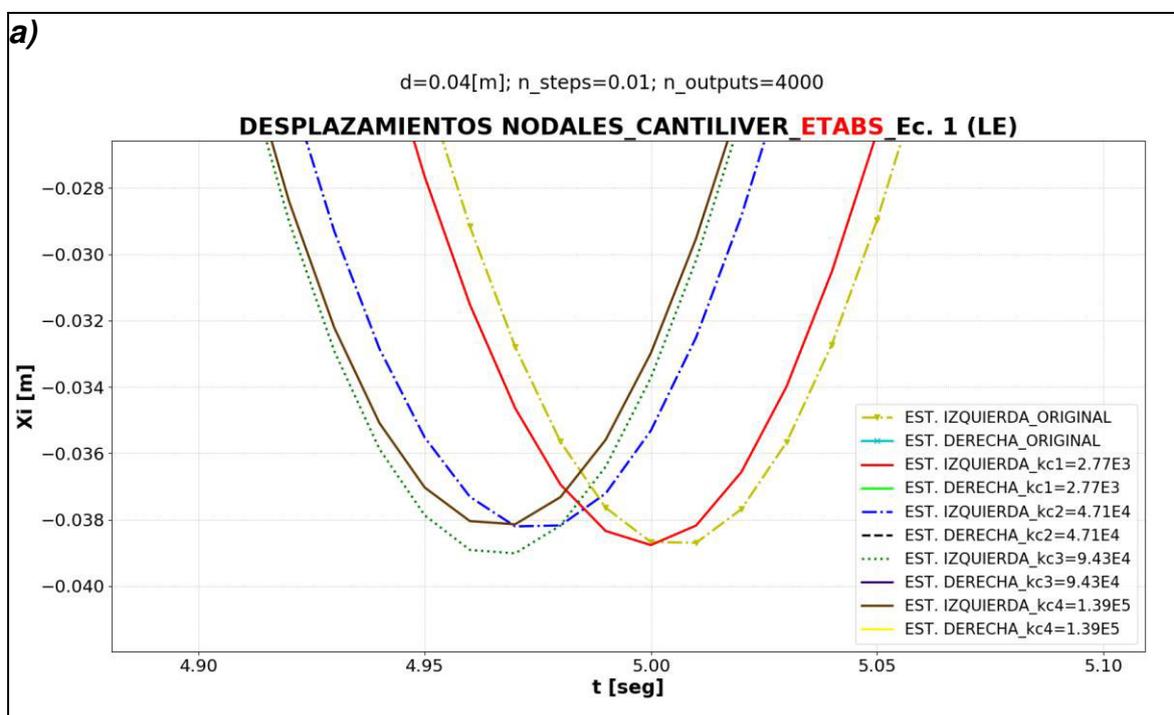
Figura 5.43: Inconsistencias en la zona del primer impacto
a) ETABS modelo elástico lineal; **b)** OpenSees Modelo elástico lineal &
c) OpenSees Modelos viscoelástico no lineal

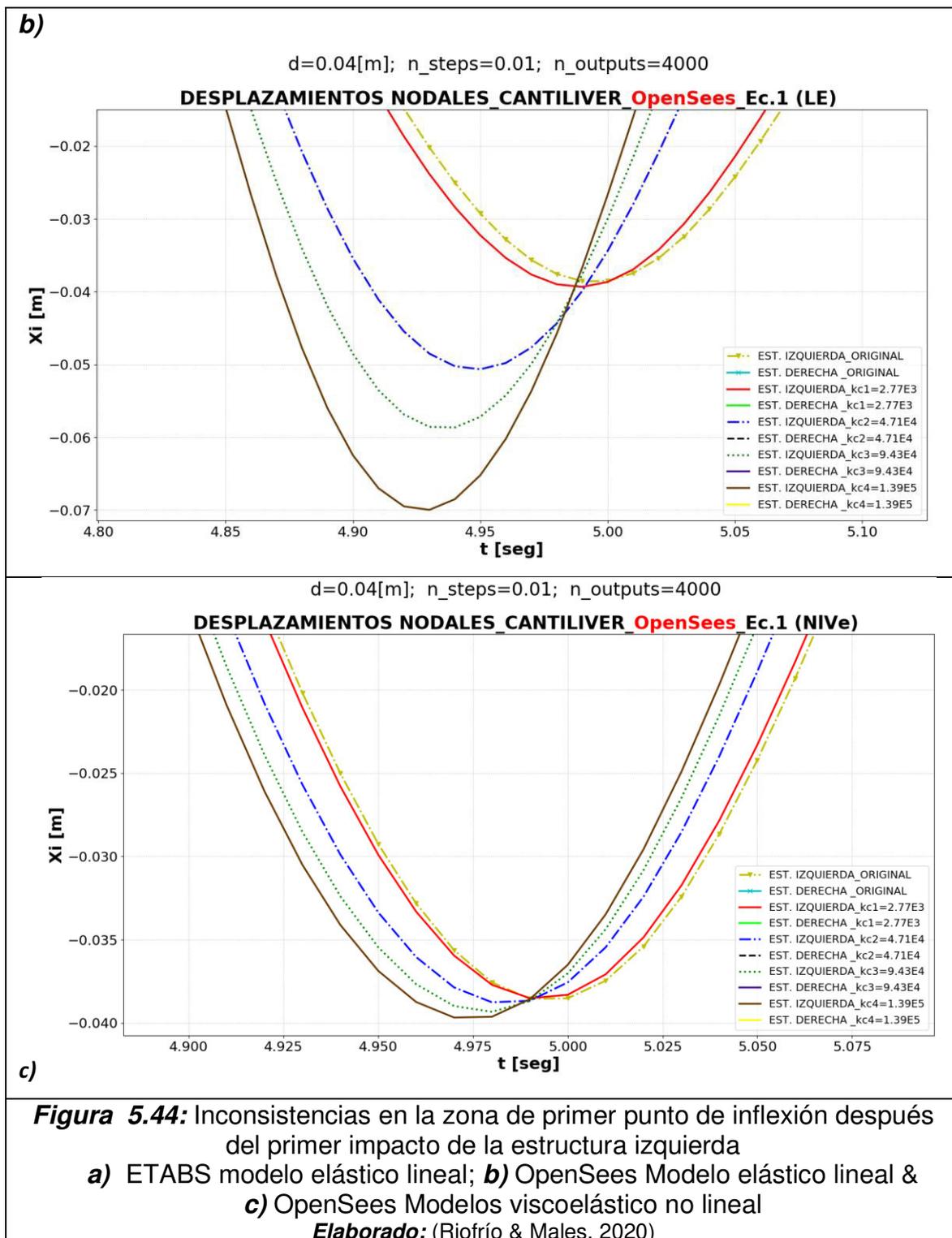
Elaborado: (Riofrío & Males, 2020)

5.4.2.2 Inconsistencias de desplazamientos en el primer punto de inflexión después del primer impacto

Al evaluar un poco más a profundidad el elemento GAP de ETABS en cantiliver con rigideces calculadas con la ecuación (4.1) en la zona de primer punto de inflexión después del primer impacto de la estructura izquierda. Se observa que a pesar de aumentar las fuerzas de colisión no aumenta la amplitud del desplazamiento nodal (ver Figura 5.44 a). Mientras que en OpenSees si se observa un patrón directamente proporcional ya que a medida que aumenta la fuerza de colisión existe mayor amplitud en los desplazamientos nodales (ver Figura 5.44 b c).

Para análisis teniendo en cuenta la rigidez calculada a partir de la ecuación (4.2) se mantienen los patrones antes mencionados.

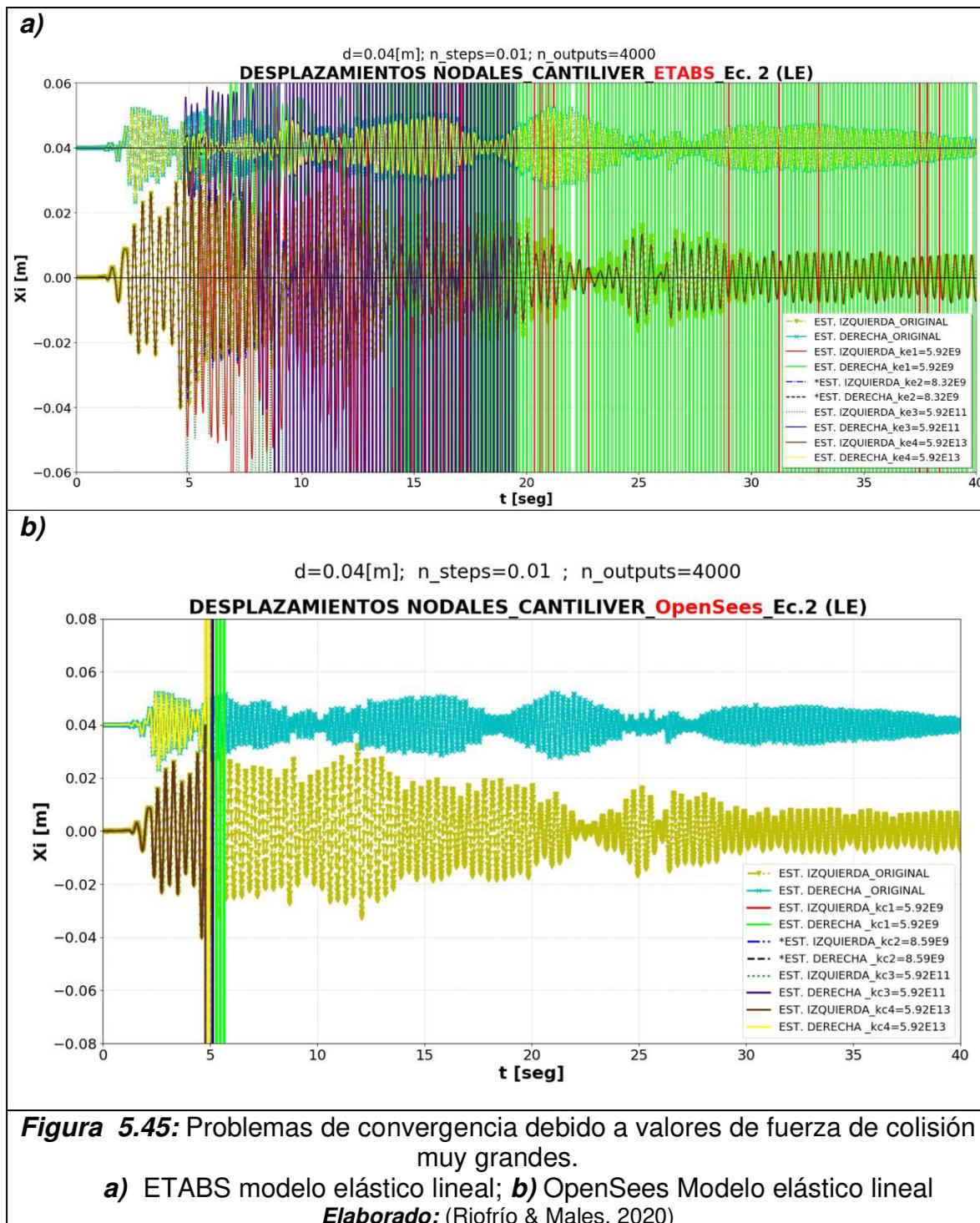




5.4.2.3 Problemas de convergencia debido a valores de fuerza de colisión muy grandes

Al evaluar un poco más a profundidad el elemento GAP de ETABS en cantiliver con rigideces calculadas con la ecuación (4.2) se pueden observar patrones erráticos en ETABS cuando se aumenta las fuerzas de colisión (ver Figura 5.45 a),

mientras que en OpenSees existen patrones más estables y lógicos que responden en una relación directamente proporcional, a fuerzas de colisión antes aparecen las dificultades numéricas (ver Figura 5.45 b).



CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La rigidez de impacto (β) es el parámetro menos confiable y el más influyente cuando no se cuenta con una parte experimental. Un valor adecuado para un experimento en específico se puede alcanzar mediante procesos iterativos que igualen la fuerza de colisión del experimento con el modelo numérico. Para modelos únicamente numéricos solo se puede especular con valores que surgen de ecuaciones recomendadas con lo cual se debe tener especial cuidado en su aplicación ya que pueden generar gran variabilidad en la magnitud de las fuerzas de colisión.
- En menor medida influye el coeficiente de restitución (e) y el amortiguamiento de impacto (ξ).
- Después de revisar el (CSI Analysis Reference Manual) y evaluar el elemento GAP que propone ETABS suponemos que funciona con la teoría del modelo elástico lineal, ya que es el único que no cuenta con un amortiguador viscoso en su formulación. Una vez identificada la teoría se procedió a programar en OpenSees donde se obtuvo resultados muy similares en las fuerzas de colisión para el caso en que se considera una rigidez de impacto $k=2.77e3$ [N/m] obtenida de la ecuación (4.1) en el modelo cantiliver, sin embargo, este fue el único ya que para valores superiores de rigidez la forma en que responden las estructuras después del primer impacto fue diferente.
- Con rigidez de impacto $k=9.43e4$ [N/m] obtenida de la ecuación (4.1) en el modelo pórtico espacial la magnitud de fuerzas de colisión calculado mediante el modelo viscoelástico no lineal de OpenSees (***Dynamic_WITH_Pounding_NIVe***) y modelo elástico lineal (***Dynamic_WITH_Pounding_LE***) es más conservador que al calcular mediante modelo elástico lineal de ETABS, llegando a ser casi una tercera parte de la fuerza de colisión. Y debido a que en ETABS mayoritariamente existe una disminución del desplazamiento nodales en la estructura más flexible y según la experimentación de Jankowski sucede lo contrario al igual que sucede con OpenSees, los códigos en este caso son más adecuado.

- La magnitud de las fuerzas de colisión es muy sensible a pequeños cambios en los desplazamientos nodales, por lo tanto, a todas las variables que se involucran al determinar los desplazamientos nodales.
- En los experimentos revisados se evidencia una falta de variables para realizar mejores comparaciones que eviten subjetividades como las que se propone en esta tesis, las cuales fueron señaladas en el subcapítulo 3.6.2.3 como variables de salida.
- En todos los casos donde exista poca o ninguna modificación de la zona de certeza se presenta el primer impacto exactamente en el mismo tiempo lo que indica que independiente del modelo que se ocupa los controladores se activan igual, los inconvenientes surgen después de aplicada la primera fuerza de impacto, en ETABS no se observa ningún patrón lógico mientras que en OpenSees si existen patrones lógicos y consistentes para cuando las estructuras son modeladas en el rango lineal.
- Los controladores de activación de las fuerzas de colisión con el modelo elástico lineal (ETABS) únicamente está controlado mediante desplazamientos relativos y no hace diferencia entre el periodo de aproximación y el de restitución de la fuerza de colisión.
- Los controladores de activación de las fuerzas de colisión con el modelo viscoelástico no lineal (OpenSees) está controlado mediante desplazamientos relativos y velocidades relativas, de esta manera puede diferenciar entre el periodo de aproximación y el de restitución de la fuerza de colisión.
- En la modelación numérica del cantiliver y pórtico espacial en (OpenSees) y (ETABS). La zona de certeza para todas las variaciones de rigidez de impacto no se modifica, al igual que para el CASO A del pórtico espacial en (ETABS). Para este caso se crearon nudos adicionales en la mitad de las vigas colindantes donde se supone va a existir contacto. Para los CASO B Y C del pórtico espacial (ETABS) si existe modificación de la zona de certeza cuando se coloca GAPS en una esquina o en ambas esquinas. La influencia del elemento gap es tal que puede llegar a desaparecer el primer impacto.
- Al evaluar un poco más a profundidad el elemento GAP de ETABS se observan varios patrones no deseados tales como Inconsistencias en la zona del primer impacto, Inconsistencias de desplazamientos en el primer punto de inflexión

después del primer impacto y Problemas de convergencia debido a valores de fuerza de colisión muy grandes. Todos estos patrones son discutidos a detalle en el subcapítulo 5.4.2. Por el contrario, con los códigos propuesto (*Dynamic_WITH_pounding_NIVE*) y (*Dynamic_WITH_pounding_LE*) en OpenSees si se observa patrones consistentes.

- ETABS presenta problemas al analizar grandes cantidades de datos, limitando el exportar los resultados obtenidos por ejemplo para el caso cantiliver cuando se trabajó con $n_pasos=4000000$.
- OpenSees y ETABS generan inconsistencias numéricas ante la acción de grandes fuerzas de colisión, se debe recalcar que en ETABS solo se puede resolver las ecuaciones dinámicas de movimiento con un único método numérico durante el análisis mientras que en OpenSees puede probar varios métodos de solución sin embargo persiste el problema.
- Al calcular las fuerzas de colisión variando los periodos de discretización se observa que en OpenSees existe una relación inversamente proporcional ya que al aumentar el periodo de discretización disminuyen las fuerzas de colisión, a causa de una disminución en la penetración relativa, mientras que en ETABS se observa una relación proporcional ya que al aumentar el periodo de discretización aumentan las fuerzas de colisión, pero no se puede concluir que sea debido a un aumento de la penetración relativa ya que como se muestra en el subcapítulo 5.2.2.2 no siempre se cumple la relación.
- La ecuación (4.1) reduce la incertidumbre al ser calculada ya que toma en cuenta la rigidez lateral de la estructura. Este valor parece ser el idóneo para implementar al elemento gap. Mientras la ecuación (4.2) debe ser calculada acorde al lugar donde sea ubicada. Estas consideraciones son las que generan dudas al momento del ser implementada por los diversos criterios de los investigadores que las usan.
- (Abdel Raheem et al., 2019) y (Arpitha, K. Umadevi, 2016) recomiendan el uso de un coeficiente γ , este coeficiente para la rigidez obtenidas de las ecuaciones (4.1) y (4.2) permite llegar a valores que parecen lógicos, pero pueden estar lejos de los que proponen en las investigaciones experimentales así es el caso aplicado en Jankowski ($8.32e9$) que con la ecuación (4.1) quedan muy por

debajo, mientras que con la ecuación (4.2) se obtienen valores más cercanos, sin embargo, puede conducir a cambios significativos.

- Para el caso de cantiliver la fuerza máxima de colisión es 301 [N] y para el caso de la estructura 3D la fuerza máxima de colisión es 156 [N]. A pesar de usar los mismos valores de rigidez y desplazamientos relativos muy similares la fuerza máxima de colisión es diferente.
- En los casos donde se ha usado la ecuación (4.2), para ciertos valores de rigidez los desplazamientos nodales alcanzan magnitudes de desplazamiento de hasta 1^{16} [m]. De igual manera al variar la posición del elemento gap en la estructura 3D para el caso 2 y 3. No existen fuerzas de colisión. Por esta razón estos valores de rigidez no serán tomados en cuenta al momento de comparar los resultados obtenidos del programa ETABS y OpenSees.
- Una vez realizada las comparaciones y exponer los patrones de inconsistencias se puede afirmar que al utilizar los elementos GAP se debe tener cuidado al aceptar los valores que nos proporciona, mientras que en OpenSees en una etapa inicial se observan patrones lógicos y consistentes, que con mayor investigación pueden ser depurados y mejorados.
- Es necesario optimizar los modelos numéricos, suponiendo cuales elementos no van a incursionar en el rango no lineal ya que el análisis de golpeteo requiere un alto costo computacional cuando el tiempo de discretización es muy reducido, muestra de ello es el Caso 3 de modelo de OpenSees con el tiempo de discretización más bajo en el que se ha invirtió 6 días de cálculo y no se ha obtenido una respuesta.

- En la tabla (6.1), se muestran los valores de rigidez que mejores resultados mostraron. Este valor se obtiene al usar la ecuación (4.1) y el valor de rigidez propuesto por Jankowski. En cada caso se evaluaron las zonas de interés, si el comportamiento es favorable está marcado con un visto caso contrario está marcado con una X.

Tabla 6.1:

Mejores resultados en ETABS

ETABS (LE)	Z. impacto	Rigidez de colisión	T_discretización	# golpes	Inconsistencias			
					Z. de certeza	Zona de 1er impacto	1er punto de inflexión	Convergencia numérica
Cantiliver	PISO 1	kc3=9.43e4	0.01	1	✓	✓	✓	✓
Pórtico Espacial (Caso A)	PISO 1	Ke2=8.32e9	0.01	1	✓	✓	X	✓

Elaborado: Riofrío & Males, 2020**Tabla 6.2:**

Mejores resultados en OpenSees

OpenSees (Nive)	Z. impacto	Rigidez de colisión	# golpes	Inconsistencias				
				T_discretización	Z. de certeza	Zona de 1er impacto	1er punto de inflexión	Convergencia numérica
Caso 1	PISO 1	Ke2=8.32e9	6	1.00E-05	✓	✓	✓	✓
Caso 2	PISO 1	Ke2=8.32e9	6	2.00E-05	✓	✓	✓	✓
	PISO 2		30		✓	✓	✓	✓
Caso 3	PISO 1	Ke2=8.32e9	0	1.00E-05	✓	✓	✓	✓
	PISO 2		0		✓	✓	✓	✓
	PISO 3		70		✓	✓	✓	✓

Elaborado: Riofrío & Males, 2020

RECOMENDACIONES

- Antes de realizar un análisis con golpeteo verificar y demostrar que la zona de certeza no esté modificada y se asegure que la primera colisión suceda en el lugar esperado sino puede conducir a significativas variaciones en la zona del primer impacto, promoviendo resultados erróneos.
- Se recomienda para el análisis de golpeteo la herramienta OpenSees, la metodología presentada y el código expuesto en los anexos. Ya que presenta varias ventajas sobre ETABS, como son:
 1. Análisis con tiempos de discretización más pequeños.
 2. Asignación de amortiguamiento por regiones, por lo tanto, cada estructura tiene un amortiguamiento individual.
 3. Se puede observar el uso de la teoría viscoelástica no lineal en el código propuesto, por lo que deja de ser una caja negra para el usuario calculista.
 4. Posibilidad de modificar el código acorde a sus necesidades y nuevas investigaciones o aportes.
 5. Mayor cantidad de información en las variables de salida muy importantes para disminuir la subjetividad en los resultados.
 6. Poco trabajo de postprocesamiento de los resultados.
 7. Mas estable y no presenta patrones de inconsistencias.
 8. Es superior al describir el comportamiento no lineal de estructuras, que en este tema puede llegar a ser decisivo.
- Promover trabajos de tesis e investigación que permitan obtener rangos de valores de penetración relativa máxima y duración de las colisiones, para colocar límites o coeficientes de reducción a los análisis numéricos, ya que tanto en OpenSees como en ETABS se pueden llegar a obtener desplazamientos irracionales.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdel Raheem, S. E., Fooly, M. Y. M., Abdel Shafy, A. G. A., Taha, A. M., Abbas, Y. A., & Abdel Latif, M. M. S. (2019). *Numerical simulation of potential seismic pounding among adjacent buildings in series*. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(1), 439–471. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0455-0>
- Aguilar, P., Arias, S. (2019). *Propuesta de reforzamiento de un edificio afectado en el sismo del 16 de abril de 2016 ubicado en la ciudad de Portoviejo utilizando disipadores de energía de fluido viscoso*. Quito; Ecuador. Escuela Politecnica Nacional.
- Arash, E. Z., Soroushian, S., Echeverria A. M., Maragakis, M., & Bagtzoglou, A., (2016). *Development and validation of a numerical model for suspended-ceiling systems with acoustic tiles*.
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamic of Structures* (Fourth; PEARSON, Ed.). California.
- Guo, J., Zhong, J., Dabg, X., Yuan, W. (2016). *Seismic responses of a cable-stayed bridge with consideration of uniform temperature load*. (Article). MDPI_applied sciences
- Crozet, V., Politopoulus, I., Yang, M. Martninez, J. M., Erlicher, S. (2017). *Sensitivity analysis of pounding between adjacent structures*. Gif-sur-Yvette; Paris Universite Paris-Saclay.
- Crozet, V., Politopoulus, I., Chaudat, T. (2019). *Shake table test of structures subject to pounding*. Gif-sur-Yvette; Paris. Universite Paris-Saclay.
- Goldsmith, W., & Frasier, J. T. (1961). *Impact: The Theory and Physical Behavior of Colliding Solids*. (Vol. 28) (No. 4). doi: 10.1115/1.3641808

- Isakovic, T., Saiidi, M. S. & Fischinger, M. (2013). *Numerical Modelling of four-span bridge, bi-axially tested on three shake tables*. Nevada; United States of America. University of Nevada_Reno.
- Jankowski, R. (2005). *Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding*. Gdansk; Poland. Gdansk University of Technology.
- Jankowski, R. (2010). *Experimental study on earthquake-induced pounding between structural elements made of different building materials*. Gdansk; Poland. Gdansk University of Technology.
- Jankowski, R. & Mahmoud, S. (2015). *Eathquake-Induced Stuctural Pounding*. New York. Springer.
- Kharazian, A. & Almansa, F.L. (2017). *State-of-the-Art of Research on Seismic Pounding Between Buildings with Aligned Slabs*. Barcelona; Spain. Technical University of Catalonia.
- Khatami, S., Nadepour, H., Barros, R.,Jkubczyk, A., & Jankowsky, R. (2019). *Effective Formuls for Impact Damping Ratio for Simulation of Earthquake-induced Structural Pounding*.
- Khatiwada, S., & Chouw, N. (2014). *Limitations in simulation of building pounding in earthquakes*. *International Journal of Protective Structures*, 5 (2), 123{150. doi: 10.1260/2041-4196.5.2.123.
- Khatiwada, S., Chouw, N., & Butterworth, J. W. (2013). *Evaluation of numerical Pounding models with experimental validation*. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 46(3), 117–130.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H., & Fenves, G. L. (2006). *OpenSees command language manual*. Pacific Earthquake Engineering Research

Center,451.Retrieved from <http://opensees.berkeley.edu/OpenSees/manuals/usermanual/OpenSeesCommandLanguageManual.pdf>

- Miari, M., Choong, K. K., & Jankowski, R. (2019). *Seismic pounding between adjacent buildings: Identification of parameters, soil interaction issues and mitigation measures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Elsevier Ltd.* <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.02.024>
- Noman, M., Alam, B., Shahzada, K. & Kamal, M. (2016). *Effects of pounding on adjacent buildings of varying heights during earthquake in Pakistan Cogent Engineering, 5* . doi: 10.1080/23311916.2016.1225878
- Naderpour, H., Barros, R.H., & Khatami, S.M. (2016). *Suggestion of an equation of motion to calculate the damping ratio during earthquake based on a cyclic procedure.*
- Naderpour, H., Barros, R.H., Khatami, S.M. & Jankowsky, R. (2016). *Numerical study on pounding between two adjacent buildings under earthquake excitation.*
- Jerves, A. (2018). *Análisis por desempeño de una estructura con plasticidad distribuida mediante fibras basadas en desplazamientos.* Cuenca; Ecuador. Universidad de Cuenca.
- Papadrakakis, M., Mouzakis, H., Plevris, N., & Bitzarakis, S. (1991). *A lagrange multiplier solution method for pounding of buildings during earthquakes. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 20(11), 981–998.* <https://doi.org/10.1002/eqe.4290201102>
- Pawar, P. D., & Murnal, P. B. (2014). *Efect of Seismic Pounding on Adjacent Blocks of Unsymmetrical Buildings Considering Soil-Structure Interaction.* 4 (7), 391{395.

- Rajaram, C., & Kumar, R. P. (2015). *Three-dimensional analysis of pounding between adjacent buildings*. (May 2014).
- Singaucho, J. (n.d.). *Informe Sísmico Especial N. 18 - 2016 - Instituto Geofísico - EPN*. Retrieved 2020-02-05, from <http://www.igepn.edu.ec/1324-informe-sismico-especial-n-18-2016.html>
- Varpasou, P., & Lahtinen, M. (2015). *Smart2013 specimen: structural response by non-linear dynamic analysis*. Manchester, United Kingdom.
- Velasco, L., & Guerrero, H. (2020). *Introducción al análisis estructural con OpenSees*. Coyoacán; México. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Tenelema, P. (2017). *Comportamiento sísmico de estructuras adosadas losa con losa y evaluación de efectos asociados al impacto entre estructuras*. Guayaquil; Ecuador. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.
- Wang, F. J., Wang, L. P., Cheng, J. G., & Yao, Z. H. (2007). *Contact force algorithm in explicit transient analysis using finite-element method*. *Finite Elements in Analysis and Design*, 43 (6-7), 580-587. doi: 10.1016/j.finel.2006.12.010
- Willson, E. L. (2004). *Análisis estático y dinámico de estructuras*. (Fourth; BERKELEY, Ed.). California.
- Xue, Q., Zhang, C., He, J., Zou, G., & Zhang, J. (2016). *An Updated Analytical Structural Pounding Force Model Based on Viscoelasticity of Materials*. *Shock and Vibration*, 2016. doi: 10.1155/2016/2596923
- Xu, X., Xu, X., Lui, W., & Zhou, D. (2017). *A new formula of impact stiffness in linear viscoelastic model*. Hindawi Publishing Corporation, 2016. doi: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/5861739>

Zhao, D. H., Liu, Y., & Li, H. N. (2017). *Modified Hertz-damp model for base-isolated structural pounding simulation under near-fault earthquakes*. *Journal of Vibroengineering*, 19 (3), 1962{1979. doi: 10.21595/jve.2017.17293

Zhu, M., McKenna, F. & Scott H. M. (2017). *OpenSeesPy: Python library for the OpenSees finite element framework*.

ANEXOS

ANEXO No1

**EJEMPLO DE COMO OBTENER EL LAS FUERZAS DE COLISIÓN Y LOS
BUCLES DE HISTÉRESIS**

El ejemplo siguiente corresponde al caso 1 de estudio en el que se realiza dos vueltas de análisis en la primera vuelta los desplazamientos nodales sin las fuerzas de colisión y en la segunda vuelta de análisis los desplazamientos nodales tomando en cuenta las fuerzas de colisión.

```
import openseespy.opensees as ops
import matplotlib.pyplot as plt
import math
import numpy as np
import termcolor as trc
```

Se cargan los módulos que serán necesarios.

```
### -----DEFINO DEL MODELO-----
ops.wipe()
print(trc.colored('*** UNITS [N, m, s] ***', 'blue')) #TODO DEBE TENER LAS MISMAS UNIDADES
ops.model('basic', '-ndm', 3, '-ndf', 6)
```

Se coloca el número de dimensiones (ndm=3 ensayo tridimensional) y el número de grados de libertad (ndf=6). Además se hace hincapié en que durante el código todo debe tener unidades consistentes.

```
### -----DEFINO NUDOS-----
#PLANTA
x1=0.22 #MODELO EXPERIMENTAL Jankowsky
y1=0.3
#ELEVACION
Hc1= 0.5;
Hc2= 0.5
#DISTANCIA DEL GAP
lon_gap=0.04

# NODOS
for i in range (3):
    z_cte=8*i

    ops.node(1+z_cte,0.0,0.0,Hc1*i)
    ops.node(2+z_cte,x1,0.0,Hc1*i)
    ops.node(3+z_cte,x1+lon_gap,0.0,Hc1*i)
    ops.node(4+z_cte,x1+lon_gap+x1,0.0,Hc1*i)

    ops.node(5+z_cte,0.0,y1,Hc1*i)
    ops.node(6+z_cte,x1,y1,Hc1*i)
    ops.node(7+z_cte,x1+lon_gap,y1,Hc1*i)
    ops.node(8+z_cte,x1+lon_gap+x1,y1,Hc1*i)
#nodos maestros
ops.node(25,x1/2,y1/2,Hc1+Hc2)
ops.node(26,x1+lon_gap+x1/2,y1/2,Hc1+Hc2)
```

Definición de nudos.

```
### -----DEFINO EL TIPO DE APOYO (Restriccion=1 y Libre=0)-----
#restricciones en la base
for i in range (1,9):
    ops.fix(i,1,1,1,1,1)
#restricciones y grados de libertad por piso
ops.fix(25,0,0,1,1,0)
ops.fix(26,0,0,1,1,0)
```

Asignación de restricciones en la base y en los nodos maestros (25 y 26).

```

#####-----DEFINO EL DIAFRAGMA rigido (LUMPED MASS) -----
ops.rigidDiaphragm(3,25,17,18,21,22) #T1
ops.rigidDiaphragm(3,26,19,20,23,24) #T2

m_t_t1_1=9.485 #[Kg]
m_t_t2_1=18.34

m_r_t1_1=0.450
m_r_t2_1=0.22

ops.mass(25,m_t_t1_1,m_t_t1_1,0.0,0.0,0.0,m_r_t1_1) #ETABS
ops.mass(26,m_t_t2_1,m_t_t2_1, 0.0,0.0,0.0,m_r_t2_1) #YO

```

Definición del comportamiento como diafragma rígido y las masas que se asignara a los nodos maestros.

```

#####-----DEFINO MATERIALES Y SECCIONES-----
E=2.1e11#[N/m^2]=[Pa]
u=0.3 #(-) PARA EL ACERO
G=E/(2*(1+u))
#structure 1 _ Columna, Vigas y Arriostramientos tienen la misma sección [6*6 mm]
bc1=0.005699 #[m] OPS_LINEAL_T.izq=0.368005129.....OPS_NO_LINEAL_T.der=0.37607532018
hc1=0.005699
Ac1=bc1*hc1 #[m^2]
IcZ1=(bc1*(hc1**3))/12 #[m^4]
IcY1=(hc1*(bc1**3))/12
Jc1=0.13382*bc1**4 #[m^4]
#structure 2 _ Columna, Vigas y Arriostramientos tienen la misma sección [8*8 mm]
bc2=0.0082 #[m] OPS_LINEAL_T.der=0.2474893978.....OPS_NO_LINEAL_T.der=0.2529042845
hc2=0.0082 #[m]
Ac2=bc2*hc2
IcZ2=(bc2*(hc2**3))/12
IcY2=(hc2*(bc2**3))/12
Jc2=0.13382*bc2**4

```

Propiedades mecánicas del acero (18G2A), y secciones utilizadas, sirven para análisis en el rango lineal y también en el rango no lineal.

```

#####-----DEFINO COORDENADAS DE TRANSFORMACION -----
#####
ops.geomTransf('Linear', 1,0.0,1.0,0.0) #NOMBRE DE COLUMNAS
ops.geomTransf('Linear', 2,0.0,-1.0,0.0) #NOMBRE DE VIGAS EN X GLOBAL *****
ops.geomTransf('Linear', 3,1.0,0.0,0.0) #NOMBRE DE VIGAS EN Y GLOBAL *****
#NOMBRE DE LOS ARRIOSTRAMIENTOS
tetha1=math.atan(0.3/0.5) #rad todos los arriostramientos tienen el mismo ángulo
z_arr_c= math.cos(tetha1)
z_arr_s= math.sin(tetha1)
ops.geomTransf('Linear', 4,0.0,z_arr_c,-z_arr_s)
ops.geomTransf('Linear', 5,0.0,-z_arr_c,-z_arr_s)

```

Definición de las coordenadas de transformación para pasar de coordenadas locales a coordenadas globales.

```

### =====
### -----(RANGO NO LINEAL)-----
### =====
##

# -----DEFINO MATERIALES EN EL RANGO NO LINEAL
secTag=1
ops.uniaxialMaterial('Steel01', secTag, 357e6, 2.1e11, 0.1) #__STEEL 18G2A__ b=
## -----DEFINO SECCIONES DE HORMIGON RANGO I
secTag_left=1
ops.section('Fiber', secTag_left)
ops.patch('rect', 1, 5, 5, -(bc1)/2, -(hc1)/2, (bc1)/2, (hc1)/2)
secTag_right=2
ops.section('Fiber', secTag_right)
ops.patch('rect', 1, 5, 5, -(bc2)/2, -(hc2)/2, (bc2)/2, (hc2)/2)
numIntgrPts=5
integrationTag_left=1
ops.beamIntegration('Lobatto', integrationTag_left, secTag_left, numIntgrPts)
integrationTag_right=2
ops.beamIntegration('Lobatto', integrationTag_right, secTag_right, numIntgrPts)
# -----DEFINO ELEMENTOS EN EL RANGO NO LINEAL-----
#PRIMER PISO
# columnas
for i in range (1,9):
    if i<=2:
        ops.element('forceBeamColumn', i, i, 8+i, 1, integrationTag_left)
    elif 2<i<=4:
        ops.element('forceBeamColumn', i, i, 8+i, 1, integrationTag_right)
    elif 4<i<=6:
        ops.element('forceBeamColumn', i, i, 8+i, 1, integrationTag_left)
    elif i>6:
        ops.element('forceBeamColumn', i, i, 8+i, 1, integrationTag_right)
#vigas en x
for i in range (4):
    p1=9
    if i<=0:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p1, p1+2*i, p1+2*i+1, 2, integrationTag_left)
    elif 0<i<=1:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p1, p1+2*i, p1+2*i+1, 2, integrationTag_right)
    elif 1<i<=2:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p1, p1+2*i, p1+2*i+1, 2, integrationTag_left)
    elif 2<i<=3:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p1, p1+2*i, p1+2*i+1, 2, integrationTag_right)
#vigas en y
for i in range (4):
    p2=13
    if i<=1:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p2, p1+i, p1+i+4, 3, integrationTag_left)
    elif i>1:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p2, p1+i, p1+i+4, 3, integrationTag_right)

```

```

#SEGUNDO PISO
#columnas
for i in range (8):
    p3=17
    if i<=1:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p3, 9+i, i+p3, 1, integrationTag_left)
    elif 1<i<=3:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p3, 9+i, i+p3, 1, integrationTag_right)
    elif 3<i<=5:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p3, 9+i, i+p3, 1, integrationTag_left)
    elif i>5:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p3, 9+i, i+p3, 1, integrationTag_right)
#vigas en x
for i in range (4):
    p4=25
    if i<=0:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p4, p3+2*i, p3+2*i+1, 2, integrationTag_left)
    elif 0<i<=1:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p4, p3+2*i, p3+2*i+1, 2, integrationTag_right)
    elif 1<i<=2:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p4, p3+2*i, p3+2*i+1, 2, integrationTag_left)
    elif 2<i<=3:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p4, p3+2*i, p3+2*i+1, 2, integrationTag_right)
#vigas en y
for i in range (4):
    p5=29
    if i<=1:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p5, p3+i, p3+i+4, 3, integrationTag_left)
    if i>1:
        ops.element('forceBeamColumn', i+p5, p3+i, p3+i+4, 3, integrationTag_right)
#ARRIOSTRAMIENTOS PISO1
ops.element('forceBeamColumn', 33, 1, 13, 4, integrationTag_left)
ops.element('forceBeamColumn', 34, 10, 6, 5, integrationTag_left)
ops.element('forceBeamColumn', 35, 3, 15, 4, integrationTag_right)
ops.element('forceBeamColumn', 36, 12, 8, 5, integrationTag_right)
#ARRIOSTRAMIENTOS PISO2
ops.element('forceBeamColumn', 37, 9, 21, 4, integrationTag_left)
ops.element('forceBeamColumn', 38, 18, 14, 5, integrationTag_left)
ops.element('forceBeamColumn', 39, 11, 23, 4, integrationTag_right)
ops.element('forceBeamColumn', 40, 20, 16, 5, integrationTag_right)

```

Asignación de elementos que consideren la no linealidad del material. Para el caso 1 Jankowsky 2010 las columnas vigas y arriostramientos son con el modelo de acero Steel01.

```

#####
###% -----EIGEN VALORES (LAMBDA) Y PERIODOS -----
#####
numEigen=2
Lambdas = ops.eigen(numEigen)
Omegas=[]
T=[]
for i in range (numEigen):
    Omegas=(Lambdas[i]**0.5)
    Omegas.append(Omegas)
    T0=((2*(math.pi))/((Omegas[i])))
    T.append(T0)

```

Cálculo de periodos y omegas que serán utilizados al asignar amortiguamiento tipo rayleigh.

```

#####-----DECISIONES-----#####
while True:
    za_est=str(input('---> DESEA HACER (SOLO) UN ANALISIS ESTATICO?: (SI O NO) '))
    za_est=za_est.upper()
    if za_est=='SI' or za_est=='NO':
        break
    print('No introdujo SI O NO')
if za_est=="NO":
    za_dyn=str(input('---> DESEA HACER (SOLO) UN ANALISIS DINAMICO?: (SI O NO) '))
    za_dyn=za_dyn.upper()

if za_est=='NO' and za_dyn=='NO':
    za_est_dyn= str(input('---> DESEA HACER UN ANALISIS (ESTATICO + DINAMICO)?: (SI O NO) '))
    za_est_dyn=za_est_dyn.upper()
if za_est=="SI":
    while True:
        print('\n');zb_est=str(input('---> DESEA SABER LAS REACCIONES DE ALGUN NUDO?: (SI O NO) '))
        zb_est=zb_est.upper()
        if zb_est=='SI' or zb_est=='NO':
            break
        print('No introdujo SI O NO')
    Estatic()

```

Para este código de ejemplo se consideró una sección de decisiones que deben ser respondidas de la siguiente manera en el terminal de IPython (unos ejemplos de esto están al final de este ejemplo) pero se puede prescindir de tomar estas decisiones realizando ciertos cambios, o de ser el caso únicamente adaptar la función " del anexo 2 a un código individual.

```

elif (za_est=='NO' and za_dyn=='SI'):
    zb_est=str('NO')
# =====
za_dyn_post_pounding='NO'
ops.timeSeries('Path', 2, '-dt', 0.01, '-filePath', 'RSN6_IMPVALL.I_I-ELC180_(MODIFICADO).txt.', '-factor', 9.81)
ops.pattern('UniformExcitation', 3, 1, '-accel', 2) #how to give accelseriesTag? (4.7.2.)
ops.timeSeries('Constant', 3)
ops.pattern('Plain', 4, 3)

```

Introducción del acelerograma a ser utilizado (El Centro).

```

# =====
# #PRIMERA VUELTA
# =====
    za_dyn_post_pounding=='NO'
    za_dyn_1='NO'
    regTag=1 #(LEFT STRUCTURE_ BLUE)
    alphaM = 0.0
    betaK = 0.0
    betaKinit = 0.0
    betaKcomm = 2 * (0.004/Omegas[0])
    ops.region( regTag , '-ele' , * [1,2,5,6,9,11,13,14,17,18,21,22,25,27,29,30,33,34,37,38],
'-rayleigh' ,alphaM ,betaK , betaKinit , betaKcomm)

    regTag=2 #(RIGTH STRUCTURE_ ORANGE)
    alphaM = 0.0
    betaK = 0.0
    betaKinit = 0.0
    betaKcomm = 2 * (0.01/Omegas[1])
    ops.region( regTag , '-ele' , * [3,4,7,8,10,12,15,16,19,20,23,24,26,28,31,32,35,36,39,40]
'-rayleigh' ,alphaM ,betaK , betaKinit , betaKcomm)

    Dynamic_WITH_Pounding_NlVe(N_contactos, l_gap, n_pasos, e, zeta, beta, Fpounding)

```

Se realiza una primera vuelta de análisis en la que se analiza las estructuras sin golpeteo y se asigna amortiguamiento por regiones, un valor de amortiguamiento

para la estructura izquierda y otro para la estructura derecha. *(Si se opta por dar únicamente la segunda vuelta la imagen anterior se debe comentar y en la siguiente imagen la reasignación de las variables $ue1_i_W_out_P=ue1_i$; $ve1_i_W_out_P=ve1_i$ & $ae1_i_W_out_P=ae1_i$)

```

=====
#SEGUNDA VUELTA
=====
while True:
    print('\n');za_dyn_post_pounding=str(input('DESEA HACER UN ANALISIS POST IMPACTOS?: (SI O NO) '))
    za_dyn_post_pounding=za_dyn_post_pounding.upper()
    if za_dyn_post_pounding=='SI' or za_dyn_post_pounding=='NO':
        break
    print ('No introdujo si o no')

if (za_dyn_post_pounding=='SI'):
    ue1_i_W_out_P=ue1_i
    ve1_i_W_out_P=ve1_i
    ae1_i_W_out_P=ae1_i

ops.reset()

```

Se procede a responder la última decisión respecto a si desea hacer un análisis con golpeteo. Si la respuesta es si, el nombre de las respuestas de la primera vuelta de algunas variables cambian de nombre y en la segunda vuelta se puede a utilizar la misma función.

```

=====
# #PRIMERA VUELTA
=====
    za_dyn_post_pounding=='NO'
    za_dyn_1='NO'
    regTag=1 #(LEFT STRUCTURE_ BLUE)
    alphaM = 0.0
    betaK = 0.0
    betaKinit = 0.0
    betaKcomm = 2 * (0.004/Omegas[0])
    ops.region( regTag , '-ele' , * [1,2,5,6,9,11,13,14,17,18,21,22,25,27,29,30,33,34,37,38],
'-rayleigh' ,alphaM ,betaK , betaKinit , betaKcomm)

    regTag=2 #(RIGH STRUCTURE_ ORANGE)
    alphaM = 0.0
    betaK = 0.0
    betaKinit = 0.0
    betaKcomm = 2 * (0.01/Omegas[1])
    ops.region( regTag , '-ele' , * [3,4,7,8,10,12,15,16,19,20,23,24,26,28,31,32,35,36,39,40]
'-rayleigh' ,alphaM ,betaK , betaKinit , betaKcomm)

    Dynamic_WITH_Pounding_NlVe(N_contactos, l_gap, n_pasos, e, zeta, beta, Fpounding)

```

Se realiza la segunda vuelta de análisis en la que se considera el golpeteo.

```

elif (za_est=='NO' and za_dyn=='NO' and za_est_dyn=='SI' ):
    zb_est=str('NO')
    Estatic()
#    Dynamic()

elif (za_est=='NO' and za_dyn=='NO' and za_est_dyn=='NO' ):
    print('\n')
    print('=====')
    print('          (''USTED NO HA REALIZADO NINGUN ANALISIS ESTRUCTURAL'')          ')
    print('=====')
    ops.reset()

print('\n'); print(trc.colored('****CODIGO TERMINADO****','red'))

```

Impresión del mensaje que el código termino con éxito.

Ejemplo de la toma de decisiones en el terminal IPython.

- Cuando se decide dar dos vueltas.

```

In [1]: runfile('C:/Users/Cesar/Desktop/00. TESIS/1. PROGRAMAS MIOS/3.
JANKOWSKY/0. VERSION FINAL JANKOWSKI/2. POUNDING/Jankowsky_VF.py',
wdir='C:/Users/Cesar/Desktop/00. TESIS/1. PROGRAMAS MIOS/3. JANKOWSKY/
0. VERSION FINAL JANKOWSKI/2. POUNDING')
*** UNITS [N, m, s] ***
MAXIMO NUMERO DE NODOS = 26

---> DESEA HACER (SOLO) UN ANALISIS ESTATICO?: (SI O NO) no
---> DESEA HACER (SOLO) UN ANALISIS DINAMICO?: (SI O NO) si

Nodo maestro del primer piso (left_structure): (NUDO) 25
__Traslacional: Fx=1 Fy=2 Fz=3 __Rotacional Mx=4 My=5 Mz=6: 1

DESEA HACER UN ANALISIS POST IMPACTOS?: (SI O NO) si

Nodo maestro del primer piso (left_structure): (NUDO) 25
__Traslacional: Fx=1 Fy=2 Fz=3 __Rotacional Mx=4 My=5 Mz=6: 1

****CODIGO TERMINADO****
Tiempo de ejecucion es: 0.23483613

```

- Cuando se decide solo dar la segunda vuelta.

```
In [1]: runfile('C:/Users/Cesar/Desktop/00. TESIS/1. PROGRAMAS MIOS/3.
JANKOWSKY/0. VERSION FINAL JANKOWSKI/2. POUNDING/Jankowsky_VF.py',
wdir='C:/Users/Cesar/Desktop/00. TESIS/1. PROGRAMAS MIOS/3. JANKOWSKY/
0. VERSION FINAL JANKOWSKI/2. POUNDING')
*** UNITS [N, m, s] ***
MAXIMO NUMERO DE NODOS = 26

---> DESEA HACER (SOLO) UN ANALISIS ESTATICO?: (SI O NO) no
---> DESEA HACER (SOLO) UN ANALISIS DINAMICO?: (SI O NO) si

DESEA HACER UN ANALISIS POST IMPACTOS?: (SI O NO) si

Nodo maestro del primer piso (left_structure): (NUDO) 25
___Traslacional: Fx=1 Fy=2 Fz=3 ___Rotacional Mx=4 My=5 Mz=6: 1

****CODIGO TERMINADO****
Tiempo de ejecucion es: 0.11031450833333332
```

Además, para utilizar este ejemplo se debe tener en cuenta:

- Colocar el número máximo de nodos.

Nmax=26

```
print(trc.colored('MAXIMO NUMERO DE NODOS = 26', 'blue'))
```

- Empezar a enumerar los nodos maestros desde el primer piso de la estructura izquierda de manera alternada con la derecha hasta terminar.

ANEXO No2

**PROGRAMA (Dynamic_WITH_Pounding_NIVe) &
(Dynamic_WITH_pounding_LE) REALIZADO CON
PYTHON PY OPENSEES PARA CALCULAR LA
FUERZA DE IMPACTO Y BUCLES DE HISTÉRESIS**

Dynamic_WITH_Pounding_NIVE considera el modelo viscoelástico no lineal de fuerza de colisión.

```

#%#####
##### DYNAMIC ANALISIS WITH POUNDING #####
#####

=====
# PARAMETROS DEL GAP (constantes)
#=====

N_contactos=1      #[U]
l_gap=0.04         #[m]
e= 0.68           #[-] e=CR=coeficiente de restitution
zeta= 0.31;       #[-] zeta=IMPACT DAMPING RATIO
beta= 8.32e9;     #[N/m^3/2] beta=IMPACT STIFFNESS
T_discretizacion=0.001
n_pasos=40000     #(int)
Fpounding=1

def Dynamic_WITH_Pounding_NIVE(N_contactos, l_gap, n_pasos, e, zeta, beta, Fpounding):

global t_dyn, F_ts, Fgap_only, F_t_dyn_only, F_UDIF1_only, Fgap_maxs,F_dur, ue1_i, ve1_i,
ae1_i,Fgap_i,Fgap_dif_i,F_Nchoques_i,UDIF_i, vedif_i,F_Energy_loss_only

    N_pisos_L=N_contactos
    N_pisos_R=N_contactos

    UDIF_i=np.zeros((N_contactos,n_pasos))
    UDIF_i=UDIF_i.tolist()
    vedif_i=np.zeros((N_contactos,n_pasos))
    vedif_i=vedif_i.tolist()
    c_i=np.zeros((N_contactos,n_pasos))
    c_i=c_i.tolist()
    Fgap_i=np.zeros((N_contactos,n_pasos))
    Fgap_i=Fgap_i.tolist()
    Fgap_dif_i=np.zeros((N_contactos,n_pasos)) #Fgap_dif_i = Fgap_i[i] - Fgap_i[i-1]
    Fgap_dif_i=Fgap_dif_i.tolist()
    F_Nchoques_i=np.zeros((1,N_contactos))
    F_Nchoques_i=F_Nchoques_i.tolist()

# === VARIABLES PARA LOCALIZAR LAS POSICIONES EN LAS QUE SE GENEREAN LAS
FUERZAS DE CHOQUE ===

    F_pos=[]
    F_pos_ij=[]
    F_ts=[] #F_ts= tiempos inicial y final en el que se desarrolla la fuerza
    for i in range (N_contactos):
        F_pos.append([])
        F_pos_ij.append([])
        F_ts.append([])
#
=====
    m=np.zeros((1,N_contactos)) #masas promedio entre las estructuras colindantes
    m=m.tolist()
    m[0][0]=(m_t_t1_1*m_t_t2_1)/(m_t_t1_1+m_t_t2_1)

```

```

#TIEMPO DEL EVENTO SISMICO
t_dyn=[]
for i in range (n_pasos):
    t_dyn.append(i*(T_discretizacion)

ops.wipeAnalysis()
ops.system('BandGeneral')
ops.constraints('Transformation')
ops.test('NormDisplIncr', 1.0e-12, 10 )
ops.algorithm('Newton')
ops.numberer('RCM')
ops.integrator('Newmark', 0.5, 0.25)           #( alpha =0.5 and beta =.25)
ops.analysis('Transient')

while True:
    try:
        print("\n"); nudo=int(input('Nodo maestro del primer piso (left_structure): (NUDO) '))
        if nudo<=Nmax:
            break
        print('Excedio el numero maximo de nodos')
    except:
        print('Parametros incorrectos, vuelva a intentarlo')
while True:
    try:
        GDL=int(input('___Traslacional: Fx=1 Fy=2 Fz=3 ___Rotacional Mx=4 My=5 Mz=6: '))
        if GDL==1 or GDL==2 or GDL==3 or GDL==4 or GDL==5 or GDL==6:
            break
        print('No eligio alguna de las opciones')
    except:
        print('Parametros incorrectos, vuelva a intentarlo')

nudo_L_1=nudo
nudo_R_1=nudo_L_1+1

ue1_i=np.zeros((N_pisos_L+N_pisos_R,n_pasos)) #DESPLAZAMIENTOS NODALES
ue1_i=ue1_i.tolist()
ve1_i=np.zeros((N_pisos_L+N_pisos_R,n_pasos)) #VELOCIDADES NODALES
ve1_i=ve1_i.tolist()
ae1_i=np.zeros((N_pisos_L+N_pisos_R,n_pasos)) #ACELERACIONES NODALES
ae1_i=ae1_i.tolist()

for dt in range (n_pasos):
    ok=ops.analyze(1,T_discretizacion)

for dt in range (n_pasos):

    ok=ops.analyze(1,T_discretizacion)

    if ok != 0: # if the analysis fails try initial tangent iteration
#        print(dt)
        print(trc.colored("regular newton failed .. lets try an inital stiffness for this step",'red'))
        ops.test('NormDisplIncr', 1.0e-12, 100, 0)
        ops.algorithm('ModifiedNewton', '-initial')
        ok =ops.analyze( 1, .01)
        if ok!=0:
            tol = 1.0e-10
            iterations = 10
            ops.test('EnergyIncr', tol, iterations, 0, 2)

```

```

ops.algorithm('Broyden')
ok =ops.analyze( 1, .01)
if ok == 0:
    print("that worked .. back to regular newton")
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-12, 10 )
ops.algorithm('Newton')

for i_l in range (N_pisos_L):
    ue1_i[2*i_l][dt]=ops.nodeDisp(nudo_L_1+2*i_l, GDL)
    ve1_i[2*i_l][dt]=ops.nodeVel(nudo_L_1+2*i_l,GDL)
    ae1_i[2*i_l][dt]=ops.nodeAccel(nudo_L_1+2*i_l,GDL)

for i_r in range (N_pisos_R):
    ue1_i[2*i_r+1][dt]=ops.nodeDisp(nudo_R_1+2*i_r, GDL)
    ve1_i[2*i_r+1][dt]=ops.nodeVel(nudo_R_1+2*i_r,GDL)
    ae1_i[2*i_r+1][dt]=ops.nodeAccel(nudo_R_1+2*i_r,GDL)

if za_dyn_post_pounding=='SI': #za_dyn_post_pounding= control para que en la segunda
vuelta se activen las fuerzas

for i in range (N_contactos):
    for F in range (N_contactos):
        if F==i:
            M=m[0][i] #para diferenciar el calculo de masas en los pisos

#-----> ACTIVAR-Cuando la estructura flexible esta a la IZQUIERDA
UDIF_i[i][dt] = ue1_i[2*i][dt] - ue1_i[2*i+1][dt] - l_gap
vedif_i[i][dt] = ve1_i[2*i][dt] - ve1_i[2*i+1][dt]
c_i[i][dt]=2*zeta*((beta*(UDIF_i[i][dt]**0.5)*M)**0.5) #[?] #(zeta con constante(zeta y
beta) y variable (UDIF_i))

#-----> ACTIVAR-Cuando la estructura flexible esta a la DERECHA
# UDIF_i[i][dt] = ue1_i[2*i+1][dt] - ue1_i[2*i][dt] - l_gap
# vedif_i[i][dt] = ue1_i[2*i+1][dt] - ue1_i[2*i][dt]
# c_i[i][dt]=2*zeta*((beta*(UDIF_i[i][dt]**0.5)*M)**0.5) #[?] #(zeta con constante(zeta y
beta) y variable (UDIF_i))

#-----> CONTROLS_POUNDING

# ***** " CONTACT "-approach period (Jankowsky,2010)
*****
if UDIF_i[i][dt]>0 and vedif_i[i][dt]>0:

    Fgap_i[i][dt]=((beta*((UDIF_i[i][dt])**1.5))+c_i[i][dt]*vedif_i[i][dt])/Fpounding
    Fgap_dif_i[i][dt]=Fgap_i[i][dt]-Fgap_i[i][dt-1]

    if dt>=10:
        if Fgap_i[i][dt]!=0 and Fgap_i[i][dt-1]==0:
            F_Nchoques_i[0][i] = F_Nchoques_i[0][i]+1 #cuenta los numeros de choques
            F_pos_ij[i].append(dt-1)

F_pos[i].append(dt)
for F in range (N_contactos):
    if F==i:

```

```

ops.load(nudo_L_1+(2*i), -Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0) #la fuerza que le
genera el uno al otro
ops.load(nudo_R_1+(2*i), Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)

# ***** " CONTACT " -restitution period (Jankowsky,2010)
*****
elif UDIF_i[i][dt]>0 and vedif_i[i][dt]<=0:
    Fgap_i[i][dt]=(beta*((UDIF_i[i][dt])**1.5))/Fpounding
    Fgap_dif_i[i][dt]=Fgap_i[i][dt]-Fgap_i[i][dt-1]

    F_pos[i].append(dt)

    for F in range (N_contactos):
        if F==i:
            ops.load(nudo_L_1+(2*i), -Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0) #Si se considera
el signo de cambio
            ops.load(nudo_R_1+(2*i), Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)

# ***** " NO CONTACT " (Jankowsky,2010) *****
elif dt > 10:
    #de aqui
    if UDIF_i[i][dt] <= 0 and Fgap_i[i][dt-1]!=0: #para el ultimo punto de cierre de la fuerza
de colision
        Fgap_dif_i[i][dt]=(-Fgap_i[i][dt-1])

        for F in range (N_contactos):
            if F==i:
                ops.load(nudo_L_1+(2*i), -Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)
                ops.load(nudo_R_1+(2*i), Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)
                Fgap_i[i][dt]=0
            #hasta aqui
        elif UDIF_i[i][dt] <= 0: #todos los mayores que 10 que no sean el ultimo punto de la
fuerza de colision
            Fgap_i[i][dt]=0

        elif UDIF_i[i][dt] <= 0: # antes de dt=10
            Fgap_i[i][dt]=0
#ENERGIAS CINETICAS DURANTE EL SISMO
Ec_tw1[i][dt]=1/2*m_t_t1_1*(ve1_i[2*i][dt])**2)
Ec_tw2[i][dt]=1/2*m_t_t2_1*(ve1_i[2*i+1][dt])**2)

#
=====
# PARRA TENER LAS POSICIONES i and j DE LOS LOS VECTORES COMPLETOS POR
(SEPARADO)
#
=====

if za_dyn_post_pounding=='SI':
    for n in range (N_contactos):
        k=-1
        if F_pos[n]==[] and F_pos_ij[n]==[]:
            pass
        elif F_pos[n]!=[] and F_pos_ij[n]!=[]:
            for i in range (len(F_pos[n])-1):
                if F_pos[n][i+1]-F_pos[n][i]>1:
                    k=k+1
                    F_pos_ij[n].insert(2*k+1,F_pos[n][i]+2)

```

```

    if F_pos[n]!=[]:
        F_pos_ij[n].append(max(F_pos[n])+2)

#=====
===

Fgap_only=[] #FUERZAS DE CHOQUE POR SEPARADO
F_t_dyn_only=[] #tiempos DE CHOQUE POR SEPARADO
F_UDIF1_only=[] #PENETRACION RELATIVA DE CHOQUE POR SEPARADO
Fgap_maxs=[] #VALOR MAXIMO EN CADA CHOQUE
F_dur=[] #DURACION DE LOS CHOQUES

for i in range (N_contactos):
    Fgap_only.append([])
    F_t_dyn_only.append([])
    F_UDIF1_only.append([])
    Fgap_maxs.append([])
    F_dur.append([])

for n in range (N_contactos):
    if F_pos[n]==[] and F_pos_ij[n]==[]:
        pass
    elif F_pos[n]!=[] and F_pos_ij[n]!=[]:
        for i in range (int(len(F_pos_ij[n])/2)):
            posi=F_pos_ij[n][2*i]
            posj=F_pos_ij[n][2*i+1]
            Fgap_only_i=Fgap_i[n][posi:posj]
            F_t_dyn_only_i=t_dyn[posi:posj]
            F_UDIF1_only_i=UDIF_i[n][posi:posj]

            F_dur[n].append(F_ts[n][2*i+1]-F_ts[n][2*i])

            Fgap_maxs[n].append(max(Fgap_only_i))
            Fgap_only[n].append(Fgap_only_i)
            F_t_dyn_only[n].append(F_t_dyn_only_i)
            F_UDIF1_only[n].append(F_UDIF1_only_i)

```

```
##$#MODIFICACION del vector desplazamiento ESTRUCTURA DERECHA para GRAFICAR
```

```
for i in range (N_contactos):
    for j in range (n_pasos):
        ue1_i[2*i+1][j]=ue1_i[2*i+1][j]+l_gap
```

```
##$#
```

```
if za_dyn_post_pounding=='NO':
```

```
for i in range (N_contactos):
```

```
    achu=2.4
```

```
    achu2=16
```

```
    plt.figure(i+2);plt.plot(t_dyn,ue1_i[2*i],label='EST. IZQUIERDA ORIGINAL (SIN
    GOLPETEO)',linewidth=achu);
```

```
    plt.legend(loc=4,fontsize=achu2, shadow=True, ncol=2)
```

```
    plt.figure(i+2);plt.plot(t_dyn,ue1_i[2*i+1],label='EST. DERECHA ORIGINAL (SIN
    GOLPETEO)',linewidth=achu);
```

```
    plt.legend(loc=4,fontsize=achu2, shadow=True, ncol=2)
```

```
    plt.title('DESPLAZAMIENTOS NODALES PISO %s' %(i+1),fontsize=24,
    fontweight='bold');plt.show();plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold'); plt.ylabel('us [m]',
    fontsize=20, fontweight='bold')
```

```
    plt.axhline(0, color='black', lw=1);plt.axhline(0.04, color='black', lw=1)
```

```
    plt.grid(linestyle='dotted')
```

```
    plt.xticks(fontsize=18)
```

```
    plt.xlim(0.0, 40.0)
```

```
if za_dyn_post_pounding=='SI':
```

```
    achu=2.4
```

```
    achu2=16
```

```
for i in range (N_contactos):
```

```
    plt.figure(i+2);plt.plot(t_dyn,ue1_i[2*i],'r--',label='EST. IZQUIERDA (CON
    GOLPETEO)',linewidth=achu);
```

```
    plt.legend(loc=4,fontsize=achu2, shadow=True, ncol=2)
```

```
    plt.figure(i+2);plt.plot(t_dyn,ue1_i[2*i+1],'b-.',label='EST. DERECHA (CON
    GOLPETEO)',linewidth=achu);
```

```
    plt.legend(loc=4,fontsize=achu2, shadow=True, ncol=2)
```

```
    plt.title('DESPLAZAMIENTOS NODALES PISO %s' %(i+1),fontsize=24,
    fontweight='bold');plt.show();plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold'); plt.ylabel('Xi [m]',
    fontsize=20, fontweight='bold')
```

```

plt.axhline(0, color='black', lw=1);plt.axhline(0.04, color='black', lw=1)

plt.grid(linestyle='dotted')

plt.xticks(fontsize=18)

plt.yticks(fontsize=18)

plt.xlim(0.0, 40.0)

if za_dyn_post_pounding=='NO':
    for i in range (N_contactos):
        plt.figure(100);plt.plot(t_dyn,ae1_i[2*i],label='EST. IZQUIERDA ORIGINAL (SIN
        GOLPETEO)',linewidth=achu);
        plt.legend(loc=4,fontsize=achu2, shadow=True)
        plt.title('ACELERACIONES NODALES PISO %s' %(i+1),fontsize=24,
        fontweight='bold');plt.show();plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold'); plt.ylabel('$\ddot{X}$i
        [m]', fontsize=20, fontweight='bold')
        plt.grid(linestyle='dotted')
        plt.xticks(fontsize=18)
#     plt.xlim(0, 25)
    if za_dyn_post_pounding=='SI':
        for i in range (N_contactos):
            plt.figure(100);plt.plot(t_dyn,ae1_i[2*i],label='EST. IZQUIERDA (CON
            GOLPETEO)',linewidth=achu);
            plt.legend(loc=4,fontsize=achu2, shadow=True)
            plt.title('ACELERACIONES NODALES PISO %s' %(i+1),fontsize=24,
            fontweight='bold');plt.show();plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold'); plt.ylabel('$\ddot{X}$i
            [m]', fontsize=22, fontweight='bold')
            plt.grid(linestyle='dotted')
            plt.xticks(fontsize=achu2)
            plt.yticks(fontsize=achu2)

    if za_dyn_post_pounding=='NO':
        for i in range (N_contactos):
            plt.figure(101);plt.plot(t_dyn,ae1_i[2*i+1],label='EST. DERECHA ORIGINAL
            (SIN GOLPETEO)',linewidth=achu);
            plt.legend(loc=4,fontsize=achu2, shadow=True)
            plt.title('ACELERACIONES NODALES PISO %s' %(i+1),fontsize=24,
            fontweight='bold');plt.show();plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold'); plt.ylabel('$\ddot{X}$i
            [m]', fontsize=20, fontweight='bold')

```

```

#     plt.axhline(0, color='black', lw=1);plt.axhline(0.04, color='black', lw=1)
        plt.grid(linestyle='dotted')
        plt.xticks(fontsize=18)
#     plt.xlim(0, 25)

if za_dyn_post_pounding=='SI':
    for i in range (N_contactos):
        plt.figure(101);plt.plot(t_dyn,ae1_i[2*i+1],'b-.',label='EST. DERECHA (CON
        GOLPETEO)',linewidth=achu);
            plt.legend(loc=4,fontsize=achu2, shadow=True)
            plt.title('ACELERACIONES NODALES PISO %s' %(i+1),fontsize=24,
            fontweight='bold');plt.show();plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold'); plt.ylabel('$\ddot{X}$i
            [m]', fontsize=20, fontweight='bold')
#     plt.axhline(0, color='black', lw=1);plt.axhline(0.04, color='black', lw=1)
        plt.grid(linestyle='dotted')
        plt.xticks(fontsize=18)
        plt.yticks(fontsize=18)

if za_dyn_post_pounding=='SI':
    achu=1.4
    achu2=16

    for i in range (N_contactos): #CUANDO NO QUIERA TODOS LOS GRAFICOS COMENTAR
    ESTA LINEA Y MODIFICAR INDIVIADUALMENTE
        plt.figure();plt.plot(t_dyn,Fgap_i[i]);plt.title('FUERZA DE COLISIÓN _PISO %s' %(i+1),
        fontsize=24, fontweight='bold');
            plt.xlabel('t [seg]',fontsize=22, fontweight='bold');
            plt.ylabel('F(t) [N]',fontsize=22, fontweight='bold');
            plt.grid(linestyle='dotted')
            plt.xticks(fontsize=18)
            plt.yticks(fontsize=18)
            plt.xlim(0.0, 40.0)

        plt.figure();plt.plot(UDIF_i[i],Fgap_i[i]);plt.title('BUCLES DE HISTÉRESIS (NIVE)_PISO %s'
        %(i+1), fontsize=24, fontweight='bold' );

```

```
plt.xlabel('d(t) [m]', fontsize=22, fontweight='bold'); plt.ylabel('F(t) [N]', fontsize=22,
fontweight='bold')
```

```
plt.grid(linestyle='dotted')
```

```
plt.xticks(fontsize=18)
```

```
plt.yticks(fontsize=18)
```

```
plt.figure();plt.plot(t_dyn,UDIF_i[i]);plt.title('DESPLAZAMIENTO RELATIVO_PISO %s'
%(i+1), fontsize=24, fontweight='bold');plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold');
plt.ylabel('d(t) [m]', fontsize=22, fontweight='bold')
```

```
plt.grid(linestyle='dotted')
```

```
plt.axhline(0.0, color='black', lw=1)
```

```
plt.xticks(fontsize=18)#, rotation=90
```

```
plt.yticks(fontsize=18)
```

```
plt.figure();plt.plot(t_dyn,vedif_i[i]);plt.title('VELOCIDAD RELATIVA_PISO %s' %(i+1),
fontsize=24, fontweight='bold');plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold');
plt.ylabel('$\dot{d}(t)$ [m/s]', fontsize=22, fontweight='bold')
```

```
plt.grid(linestyle='dotted')
```

```
plt.axhline(0.0, color='black', lw=1)
```

```
plt.xticks(fontsize=18)
```

```
plt.yticks(fontsize=18)
```

```
plt.figure();plt.plot(t_dyn,Ec_tw1[i]);plt.title('ENERGIA CINÉTICA ESTRUCTURA %s '
%(i+1), fontsize=24, fontweight='bold');plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22, fontweight='bold');
plt.ylabel('1/2*m1*va^2 [Nm]', fontsize=22, fontweight='bold')
```

```
plt.grid(linestyle='dotted')
```

```
plt.axhline(0.0, color='black', lw=1)
```

```
plt.xticks(fontsize=18)#, rotation=90
```

```
plt.yticks(fontsize=18)
```

```
plt.figure();plt.plot(t_dyn,Ec_tw2[i]);plt.title('ENERGÍA CINÉTICA ESTRUCTURA %s'
%(i+2), fontsize=24, fontweight='bold');plt.xlabel('t [seg]', fontsize=22); plt.ylabel('1/2*m2*vb^2
[Nm]', fontsize=22)
```

```
plt.grid(linestyle='dotted')
```

```
plt.axhline(0.0, color='black', lw=1)
```

```
plt.xticks(fontsize=18)
```

```
plt.yticks(fontsize=18)
```

```
# para RESTITUIR A LOS VALORES PARA EL ANALISIS en el EXPLORADOR DE VARIABLES

# for i in range (N_contactos):
#     for j in range (n_pasos):
#         ue1_i[2*i+1][j]=ue1_i[2*i+1][j]-l_gap
return
```

Dynamic_WITH_Pounding_LE considera el modelo elástico lineal de fuerza de colisión, único modelo que no cuenta con amortiguador viscoso en su formulación y suponemos que es la teoría que sigue programas comerciales como ETABS, en rojo están los cambios realizados al código anterior.

```
#-----> ACTIVAR-Cuando la estructura flexible esta a la IZQUIERDA
UDIF_i[i][dt] = -ue1_i[2*i][dt] + ue1_i[2*i+1][dt] + l_gap
vedif_i[i][dt] = ve1_i[2*i][dt] - ve1_i[2*i+1][dt]
c_i[i][dt]=2*zeta*((beta*(UDIF_i[i][dt]**0.5)*M)**0.5)

#-----> CONTROLS_POUNDING
# ***** " CONTACT "-approach period *****
if UDIF_i[i][dt]<0:
    Fgap_i[i][dt]=(beta*((UDIF_i[i][dt])**1.0))/Fpounding
    Fgap_dif_i[i][dt]=Fgap_i[i][dt]-Fgap_i[i][dt-1]
    if dt>=10:
        if Fgap_i[i][dt]!=0 and Fgap_i[i][dt-1]==0:
            F_Nchoques_i[0][i] = F_Nchoques_i[0][i]+1
            F_pos_ij[i].append(dt-1)
    F_pos[i].append(dt)
for F in range (N_contactos):
    if F==i:
        ops.load(nudo_L_1+(2*i), Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)
```

```
ops.load(nudo_R_1+(2*i), -Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)
```

```
# ***** " NO CONTACT * *****
```

```
elif dt > 10:
```

```
  if UDIF_i[i][dt] >= 0 and Fgap_i[i][dt-1]!=0:
```

```
    Fgap_dif_i[i][dt]=(-Fgap_i[i][dt-1])
```

```
    for F in range (N_contactos):
```

```
      if F==i:
```

```
        ops.load(nudo_L_1+(2*i), Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)
```

```
        ops.load(nudo_R_1+(2*i), -Fgap_dif_i[i][dt],0.0,0.0,0.0,0.0,0.0)
```

```
        Fgap_i[i][dt]=0
```

```
      elif UDIF_i[i][dt] >= 0:
```

```
        Fgap_i[i][dt]=0
```

```
elif UDIF_i[i][dt] >= 0:
```

```
  Fgap_i[i][dt]=0
```