



UNIVERSIDAD
**SAN IGNACIO
DE LOYOLA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Civil

**ESTUDIO DE LA CAPACIDAD SÍSMICA RESIDUAL DE UN
COLEGIO TÍPICO DEL PERÚ PARA DETERMINAR SU USO
DESPUÉS DE UN EVENTO SÍSMICO SEVERO**

Tesis para optar el Título Profesional de

Ingeniero Civil

EDGAR MAICOL RODRÍGUEZ

CARRANZA

(0000-0003-4359-0920)

Asesor:

Dr. Miguel Augusto Díaz Figueroa

(0000-0002-9421-4194)

Lima - Perú

2021

*La medida de la inteligencia es
la capacidad de cambiar.*

A. Einstein

Índice de Contenidos

Dedicatoria	XIII
Agradecimiento	XIV
Resumen.....	XV
Abstract	XVI
Introducción	1
Capítulo I: Planteamiento del Problema	3
1.1 Situación Problemática	3
1.2 Formulación del Problema.....	5
1.2.1 Problema General	5
1.2.2 Problemas Específicos	5
1.3 Justificación de la Investigación.....	5
1.4 Objetivos de la investigación.....	7
1.4.1 Objetivo principal	7
1.4.2 Objetivos Específicos	7
Capítulo II: Marco Teórico	7
2.1 Antecedentes del Problema	7
2.1.1 Antecedentes Internacionales.	7
2.1.2 Antecedentes Nacionales.	11
2.2 Bases Teóricas	13
2.2.1 Sismología	13
2.2.2 Demanda	14
2.2.3 Análisis estático no lineal	14

2.2.4	Análisis dinámico no lineal tiempo - historia	16
2.3	Marco Conceptual.....	18
2.3.1	Colegio 780 POST 1997	18
2.3.2	Daño sísmico	18
2.3.3	Análisis tiempo – historia	19
2.3.4	Capacidad sísmica	19
2.3.5	Capacidad sísmica residual	19
Capítulo III:	Hipótesis y Variables	19
3.1	Hipótesis	19
3.1.1	Hipótesis General	19
3.1.2	Hipótesis Específicas	19
3.2	Identificación de las Variables	20
3.2.1	Objeto de estudio	20
3.2.2	Variables a estudiar.....	20
3.3	Operacionalización de las Variables.....	20
Capítulo IV:	Metodología	21
4.1	Tipo y Diseño de Investigación	21
4.1.1	Tipo de Investigación	21
4.1.2	Diseño de Investigación.....	21
4.2	Población y Muestra	22
4.2.1	Población	22
4.2.2	Muestra	22

4.3	Técnicas e Instrumentos de Investigación	23
4.3.1	Técnicas	23
4.3.2	Instrumentos	23
4.4	Procedimiento de Recolección de Datos	23
Capítulo V: Análisis y Discusión de Resultados		24
5.1	Zona de estudio.....	24
5.1.1	Pulido.....	24
5.1.2	Distrito de San Luis	25
5.2	Descripción del edificio.....	27
5.2.1	Elementos estructurales	27
5.3	Propiedades de los materiales.....	33
5.3.1	Concreto.....	34
5.3.2	Acero de refuerzo	34
5.3.3	Albañilería	34
5.4	Análisis inelástico del colegio 780 POST 1997	35
5.4.1	Descripción del modelo computacional.....	35
5.4.2	Análisis estático no lineal	36
5.4.3	Análisis dinámico no lineal tiempo – historia	38
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones		55
6.1	Conclusiones.....	55
6.1.1	Conclusión General	55
6.1.2	Conclusiones Específicas	56

6.2	Recomendaciones	57
	Referencias	58
	Anexos	63
	Anexo I – Matriz de Consistencia y Operacionalización de las Variables	64
	Anexo II – Respuestas sísmicas	67
	Respuestas sísmicas obtenidas a partir del análisis dinámico no lineal tiempo - historia.....	68
	Gráficas de curvas histeréticas obtenidas a partir del análisis dinámico no lineal tiempo – historia.....	73

Índice de Tablas

Tabla 1 Principales características de los sismos más importantes del Perú	14
Tabla 2 Siete juegos de registros sísmicos usados en el análisis dinámico no lineal tiempo – historia.....	17
Tabla 3 Definición conceptual de las variables	20
Tabla 4 Operacionalización de las variables.....	20
Tabla 5 Masas inerciales y pesos	36
Tabla 6 Respuestas máximas alcanzadas de los análisis dinámico no lineal tiempo – historia (piso 01)	39
Tabla 7 Respuestas máximas alcanzadas de los análisis dinámico no lineal tiempo – historia (piso 02)	45
Tabla 8 Respuesta máxima (piso 01)	51
Tabla 9 Respuesta máxima amplificada (piso 01)	51
Tabla 10 Respuesta máxima (piso 02)	53
Tabla 11 Respuesta máxima amplificada (piso 02)	53
Tabla 12 Matriz de consistencia.....	65
Tabla 13 Operacionalización de las variables.....	66

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución modal. Adaptado de “Technical Manual Version 6.4”	15
Figura 2. Curva de capacidad del sistema SDOF equivalente. Adaptado de “Technical Manual Version 6.4”	16
Figura 3. Espectros amplificados al espectro de diseño considerando los criterios de la NTE E030	17
Figura 4. Edificios como este edificio de oficinas en Kobe, Japón, son generalmente inestables y pueden colapsar en una réplica. Adaptado de “Earthquake Aftershocks – Entering Damage Buildings”	18
Figura 5. Módulo típico del colegio 780 POST 97.....	27
Figura 6. Plano en planta nivel 01.	28
Figura 7. Plano en planta nivel 02.	28
Figura 8. Modelo de equivalencia de columna T a columna rectangular.	29
Figura 9. Diagrama de interacción de columna.	29
Figura 10. Diagrama de momento curvatura de la columna T y de la columna equivalente rectangular respectivamente en la dirección más corta.....	30
Figura 11. Diagrama de momento curvatura de la columna T y de la columna equivalente rectangular respectivamente en la dirección más larga.....	30
Figura 12. Secciones típicas de las columnas.	31
Figura 13. Secciones típicas de las vigas.	31
Figura 14. Parámetros de análisis inelástico de la albañilería.	32
Figura 15. Curva de Capacidad - Muro de albañilería.....	33
Figura 16. Curva de Capacidad - Muro de albañilería.....	33
Figura 17. Modelo matemático tridimensional.....	35
Figura 18. Curva de Capacidad en la dirección longitudinal.....	36

Figura 19. Espectro de Capacidad en la dirección longitudinal.	37
Figura 20. Curva de Capacidad en la dirección transversal.....	37
Figura 21. Espectro de Capacidad en la dirección transversal.	37
Figura 22. Ejemplo esquemático de los registros sísmicos ingresados al software para realizar el análisis dinámico no lineal tiempo - historia.	38
Figura 23. Desplazamiento residual en la dirección longitudinal para los tres eventos.	40
Figura 24. Desplazamiento residual en la dirección transversal para los tres eventos.	41
Figura 25. Desplazamiento máximo absoluto en la dirección longitudinal para los tres eventos.	41
Figura 26. Desplazamiento máximo absoluto en la dirección transversal para los tres eventos.	42
Figura 27. Desplazamiento máximo relativo en la dirección longitudinal para los tres eventos.	42
Figura 28. Desplazamiento máximo relativo en la dirección transversal para los tres eventos.	43
Figura 29. Desplazamiento residual vs Desplazamiento máximo absoluto en la dirección longitudinal.	43
Figura 30. Desplazamiento residual vs Desplazamiento máximo absoluto en la dirección transversal.	44
Figura 31. Desplazamiento residual en la dirección longitudinal para los tres eventos.	46
Figura 32. Desplazamiento residual en la dirección transversal para los tres eventos.	47
Figura 33. Desplazamiento máximo absoluto en la dirección longitudinal para los tres eventos.	47
Figura 34. Desplazamiento máximo absoluto en la dirección transversal para los tres eventos.	48

Figura 35. Desplazamiento máximo relativo en la dirección longitudinal para los tres eventos.	48
Figura 36. Desplazamiento máximo relativo en la dirección transversal para los tres eventos.	49
Figura 37. Desplazamiento residual vs Desplazamiento máximo en la dirección longitudinal.	49
Figura 38. Desplazamiento residual vs Desplazamiento máximo en la dirección transversal.	50
Figura 39. Respuesta máxima amplificada en la dirección longitudinal para los tres eventos (piso 01).	52
Figura 40. Respuesta máxima amplificada en la dirección transversal para los tres eventos (piso 01).	52
Figura 41. Respuesta máxima amplificada en la dirección longitudinal para los tres eventos (piso 02).	54
Figura 42. Respuesta máxima amplificada en la dirección transversal para los tres eventos (piso 02).	54
Figura 43. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Lima 1966.	68
Figura 44. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Lima 1966.	68
Figura 45. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Huaraz 1970.....	68
Figura 46. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Huaraz 1970.....	69
Figura 47. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Lima 1974 octubre.....	69

Figura 48. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Lima 1974 octubre.....	69
Figura 49. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Lima 1974 noviembre.	70
Figura 50. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Lima 1974 noviembre.	70
Figura 51. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Iquique 2005.....	70
Figura 52. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Iquique 2005.....	71
Figura 53. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Pisco 2007.	71
Figura 54. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Pisco 2007.	71
Figura 55. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Tacna 2010.....	72
Figura 56. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Tacna 2010.	72
Figura 57. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.....	73
Figura 58. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.....	73
Figura 59. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.....	74
Figura 60. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.....	74
Figura 61. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.....	74
Figura 62. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.....	74
Figura 63. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.	74

Figura 64. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.....	74
Figura 65. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.....	74
Figura 66. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.....	74
Figura 67. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.....	74
Figura 68. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.....	74
Figura 69. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.....	74
Figura 70. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.....	74

Glosario de Abreviaciones

ATC-40: Applied Technology Council.

S_a : Aceleración espectral.

S_d : Desplazamiento espectral.

NTE E.030: Norma Técnica de Edificaciones E.030 de Diseño Sismorresistente.

DR_x y DR_y : Desplazamiento Residual.

$sd_x min$ y $sd_y min$: Desplazamiento relativo mínimo. Valor de desplazamiento relativo pico en la dirección negativa.

$sd_x max$ y $sd_y max$: Desplazamiento relativo máximo. Valor de desplazamiento relativo pico en la dirección positiva.

$sd_x max abs$ y $sd_y max abs$: Desplazamiento relativo máximo absoluto. Valor absoluto de los desplazamientos relativos picos (negativo y positivo).

$sd_x max ev$ y $sd_y max ev$: Desplazamiento relativo máximo que se da a partir de cada evento. A este desplazamiento se le disminuye el desplazamiento residual del evento previo.

$Q_x max$ y $Q_y max$: Cortante de entrepiso máximo absoluto.

dr_x y dr_y : Desplazamiento relativo promedio.

V_x y V_y : Cortante de entrepiso promedio.

Dedicatoria

A mi padre Edgar Pepe Rodríguez Flores, por su constante esfuerzo y dedicación para brindarme su apoyo y poder consolidar mis metas, por sembrar en mi conciencia, una sólida personalidad a la luz de los valores humanos y prepararme para caminar por los senderos de la vida, sin desmayar en la dura brega por la lucha, hasta conquistar la culminación de mis aspiraciones.

A mi madre Nieves Carranza Castillo, por su apoyo incondicional y sus sabias palabras para superar con facilidad los difíciles obstáculos que se me presenten, por enseñarme que la humildad, el respeto y la gratitud son los principales valores familiares que me permitirán compartir una vida saludable con las personas que me rodean.

A mis hermanas Medallith Anamelva Rodríguez Carranza y Cinthia Soledad Rodríguez Carranza, por motivarme y direccionarme siempre para seguir de cerca mis objetivos planteados.

A mis familiares y amigos, quienes siempre confiaron en mi persona y me incentivaron y seguir creciente tanto personal y profesionalmente.

Agradecimiento

A Dios, por brindarme salud y conocimiento, los cuales han sido la principal fuente para desarrollar este proyecto.

A mis padres, hermanas y familiares, por su apoyo incondicional para hacer realidad mis objetivos trazados.

Al Dr. Ing. Miguel Díaz Figueroa, asesor del presente trabajo de investigación, por su tiempo y constante cooperación de sus conocimientos para la realización y culminación del estudio.

A mi casa de estudios USIL, ya que los años más interesantes de mi vida lo pase en este, mi segundo hogar, años gloriosos que jamás se borrarán de mi memoria, y que este donde siempre lo recordare con cariño, lo cual constituirá faro de luz para comportarme con altura por donde quiera que vaya, dejando siempre bien puesto el nombre de este digno e inolvidable plantel.

A mis docentes catedráticos de la Carrera de Ingeniería Civil, quienes día a día, año tras año, fueron cincelandos en mí, surcos de conocimientos, para que mañana más tarde logre ser un profesional competente, un verdadero ciudadano y para que mis padres puedan sentirse orgullosos.

En general, agradezco el apoyo de mis compañeros de estudio y de todas las personas que se interesaron en impulsarme a cumplir este objetivo.

Resumen

Los terremotos ocurridos durante los últimos años han afectado la estructura de muchas edificaciones diseñadas sin considerar los lineamientos que la normativa exige, este es el caso de los colegios típicos denominados módulos 780 diseñado durante las décadas de 1980 y 1990.

A raíz de estas deficiencias, surgen los colegios 780 POST 1997, los cuales fueron diseñados con la siguiente versión de los códigos sísmicos. Sin embargo, en la actualidad aún no se ha investigado cuál sería su comportamiento frente a diversos escenarios de demandas sísmicas. Es por esa razón, que el proyecto de investigación está orientado a desarrollar un estudio de la capacidad sísmica residual de un colegio típico del Perú ubicado en la ciudad de Lima, para determinar su uso después de un evento sísmico severo, dando a conocer el diagnóstico del estado de dicha estructura y proporcionando información sobre su habitabilidad y reparación, de tal manera que se pueda garantizar la seguridad y evitar pérdidas de vidas ante posibles réplicas, considerando que la estructura no ha agotado toda su capacidad.

La metodología empleada fue de tipo explicativo, no experimental y cuantitativo. Asimismo, para determinar el tamaño de la muestra se empleó el método de juicio por experto, tomando en cuenta la opinión de un ingeniero experto en el área de estudio, quien selecciono un colegio típico del Perú de dos niveles denominado 780 POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima, el cual fue analizado empleando el software STERA3D V10.8.

Los resultados reflejan que, la capacidad sísmica residual de la estructura indica que aún puede seguir disipando energía a pesar de haber soportado las sollicitaciones de diversas demandas sísmicas severas, mostrando un nivel de daño leve, por lo que se concluye que la edificación escolar cuenta con la capacidad de soportar posibles réplicas, por lo tanto, se estaría garantizando la seguridad a sus ocupantes y se estaría evitando pérdida de vidas humanas.

Palabras clave: Capacidad sísmica residual, demanda sísmica, réplica, daño leve.

Abstract

The earthquakes that occurred in recent years have affected the structure of many buildings designed without considering the guidelines required by the regulations, this is the case of the typical schools called 780 modules designed during the 1980s and 1990s. As a result of these deficiencies, 780 POST 1997 schools emerge, which were designed with the following version of the seismic codes. However, at present it has not yet been investigated what its behavior would be in different scenarios of seismic demands. It is for this reason that the research project is aimed at developing a study of the residual seismic capacity of a typical school in Peru located in the city of Lima, to determine its use after a severe seismic event, making the diagnosis known of the state of said structure and providing information on its habitability and repair, in such a way as to guarantee safety and avoid loss of life in the event of possible aftershocks, considering that the structure has not exhausted its full capacity.

The methodology used was explanatory, non-experimental and quantitative. Likewise, to determine the size of the sample, the expert judgment method was used, taking into account the opinion of an expert engineer in the study area, who selected a typical two-level Peruvian school called 780 POST 1997 located in the City of Lima, which was analyzed using the STERA3D V10.8 software.

The results reflect that the residual seismic capacity of the structure indicates that it can still continue to dissipate energy despite having withstood the demands of various severe seismic demands, showing a level of slight damage, which is why it is concluded that the school building has the ability to withstand possible aftershocks, therefore, the safety of its occupants would be guaranteed and loss of human life would be avoided.

Keywords: Residual seismic capacity, seismic demand, aftershock, slight damage.

Introducción

Teniendo conocimiento de que el Perú está ubicado cerca al Borde Occidental de América del Sur, el cual se caracteriza por ser una de las zonas más activas del mundo, la gran preocupación durante los últimos años es el silencio sísmico que se arrastra desde el año 1974, lo que significa que hay mucha energía acumulada, el cual en algún momento podría provocar un sismo de gran magnitud.

De acuerdo a lo que expresa (CAPECO, 2018), “En la Perú el 80% de viviendas son construcciones informales y de ese porcentaje, la mitad son altamente vulnerables a un terremoto de alta intensidad. En las zonas periféricas de las ciudades esta cifra llega al 90%”, por lo que podemos afirmar que en nuestro país gran parte de las edificaciones existentes no han sido dirigidos por profesionales especialistas en el área durante el proceso de estructuración, diseño y construcción.

Considerando que en nuestro país existe mucha informalidad en la construcción de edificaciones, se optó por investigar sobre colegios típicos del Perú denominados 780 POST 1997, del cual se determinó que dichas estructuras han sido diseñadas sin considerar la versión actualizada de los códigos sísmicos. Ante dicha problemática, surge la necesidad de establecer la capacidad sísmica residual del colegio 780-POST 1997 para determinar su uso después de un evento sísmico severo. Además, se verificará si la estructura dañada puede seguir disipando energía a pesar de haber soportado la sollicitación de una serie de escenario de demandas sísmicas.

La presente investigación abarca los siguientes capítulos:

En el Capítulo I, se argumenta de manera concisa el problema de investigación, el cual se divide en la situación problemática que forma parte de la formulación del problema, la justificación de la investigación y los objetivos.

En el Capítulo II, se define el marco teórico, donde se desarrolla los antecedentes internacionales y nacionales, las bases teóricas y finalmente el marco conceptual.

En el Capítulo III, se plantea la hipótesis general y específica, identificación de las variables y la operacionalización de las variables.

En el Capítulo IV, se propone la parte metodológica empleada en esta investigación, indicando el tipo de investigación y diseño de investigación, determinación de la población y muestra, técnicas e instrumentos empleados en el presente estudio.

En el Capítulo V, se describe los resultados obtenidos a partir del análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal tiempo historia de la estructura, enfatizando las respuestas máximas, desplazamientos residuales y nivel de daño de la edificación escolar.

En el Capítulo VI, se argumenta las conclusiones generales y las conclusiones específicas. Además, se sugiere las recomendaciones pertinentes al presente trabajo de investigación, con el fin de desarrollar un estudio más amplio sobre el comportamiento de la edificación escolar.

Capítulo I: Planteamiento del Problema

1.1 Situación Problemática

Los movimientos sísmicos son vibraciones de la corteza terrestre de corta duración, pero de intensidad variable, que pueden generar desastres y afectar estructuras consideradas resistentes a las diversas demandas sísmicas, originando incluso hasta pérdidas humanas. A raíz de ello, varios países como Italia, Grecia, Turquía, la Antigua República Yugoslava de Macedonia, Estados Unidos, Japón, México y Colombia se han visto en la necesidad de realizar algunas investigaciones para poder analizar mejor los daños ocasionados por dicho acontecimiento natural (Carreño, Cardona y Barbat, 2005).

A causa de los terremotos ocurridos durante los últimos años, muchas edificaciones escolares han colapsado. Entre ellos podemos mencionar el terremoto de Bhuj de 2001 ($M_w = 7,7$) en India, donde fallecieron 971 estudiantes y 31 maestros (Jain, 2004), el terremoto de Kashmir de 2005 ($M_w = 7,6$) en Pakistán donde fallecieron aproximadamente 19,000 niños, la mayoría de ellos en el derrumbe de edificios escolares que fueron afectados en una proporción mucho mayor que otras edificaciones (EERI, 2006), y el terremoto de Sichuan en 2008, en China ($M_w = 7,9$) que destruyó por lo menos 6,898 escuelas matando miles de alumnos y maestros (EERI, 2008).

El Perú se localiza cerca del Borde Occidental de América del Sur, el cual se caracteriza por ser una de las zonas sísmicas más activas del mundo, debido al fenómeno de subducción de la placa de Nazca bajo el Continente Sudamericano y los reajustes que se producen en la corteza terrestre como consecuencia de la interacción y la morfología alcanzada por el Aparato Andino (Castillo y Alva, 1993).

Durante el último terremoto de gran magnitud ocurrido en el Perú con epicentro en la ciudad de Pisco en el año 2007, muchos colegios de la zona construidos bajo las especificaciones de la norma sismorresistente no sufrieron daños estructurales, no obstante, las edificaciones

escolares construidos sin tener en cuenta los lineamientos de la normativa sufrieron daños estructurales severos. Frente a estos acontecimientos surge la necesidad de conocer el diagnóstico del estado de dichas estructuras, proporcionando información sobre su habitabilidad y reparación, para brindar seguridad y evitar pérdidas de vidas ante posibles réplicas (Quiroz, 2017).

En la actualidad, en el Perú existen diversas metodologías para determinar el nivel de daño de una estructura luego de la ocurrencia de un terremoto destructivo, pero aún no se han realizado estudios que determinen si la edificación seguirá disipando energía luego del evento sísmico, considerando que no ha agotado toda su capacidad.

Teniendo en cuenta que las metodologías existentes en nuestro medio están basados únicamente en la experiencia de expertos mediante la observación de los daños con el cual no se podría determinar si la estructura podrá seguir disipando energía ante una posible replica se generaría un margen de error significativo al momento de decidir sobre la habitabilidad o la demolición de la misma, por esa razón, en la siguiente investigación se plantea realizar un estudio de la capacidad sísmica residual de un colegio típico del Perú denominado 780 POST 1997, con el cual se verificará si la estructura dañada podrá seguir disipando energía luego de un evento sísmico severo.

Los colegios típicos denominados modulo 780 se diseñaron entre las décadas de 1980 y 1990, considerando parámetros y estándares peruanos de resistencia sísmica de 1977, que tenían umbrales bastante limitados. Dicha tipología estructural estaba formada por pórticos de concreto armado y muros de albañilería confinada, los cuales presentaban una serie de deficiencias frente a escenarios sísmicos severos. A raíz de ello, surgen los colegios 780 POST 1997, los cuales fueron diseñados con la siguiente versión de los códigos sísmicos. Sin embargo, algunos constructores siguieron construyendo colegios con su propia adaptación del

diseño original sin revisión calificada, lo que ocasionó que en la actualidad existan muchas edificaciones escolares con estructuras antisísmicas inadecuadas (Díaz et al., 2018).

1.2 Formulación del Problema

1.2.1 Problema General

¿De qué manera influye la capacidad sísmica residual del colegio 780-POST 1997 en la determinación de su uso después de un evento sísmico severo?

1.2.2 Problemas Específicos

- a. ¿De qué manera influyen los diversos escenarios de demandas sísmicas en la determinación del nivel de daño del colegio 780-POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima?
- b. ¿Cuál es el comportamiento de los elementos estructurales del colegio 780-POST 1997 después de un evento sísmico severo, en la Ciudad de Lima?
- c. ¿Cuál es la demanda sísmica de la réplica más probable que puede surgir en la Ciudad de Lima después de un evento sísmico severo?

1.3 Justificación de la Investigación

A causa de los terremotos ocurridos en los últimos 20 años en países ubicados en territorios con actividades sísmicas frecuentes, se han desarrollado metodologías que consisten en la evaluación de los daños de las edificaciones con la participación de profesionales avezados en el área de las estructuras, de la mecánica de suelos, de la evaluación de daños y de la habilitación de edificios. Sin embargo, en muchas ocasiones algunos profesionales con poca experiencia en el campo tienden a sobreestimar o subestimar el daño existente, permitiendo la ocupación peligrosa o la demolición innecesaria de edificios (Carreño, Cardona y Barbat, 2011).

El proyecto de investigación está orientado a desarrollar un estudio de la capacidad sísmica residual de un colegio típico del Perú ubicado en la Ciudad de Lima, para determinar su uso

después de un evento sísmico severo y garantizar la seguridad ante posibles réplicas, considerando que no ha agotado toda su capacidad.

La capacidad sísmica de una estructura se refiere a la energía total que la misma es capaz de disipar durante un sismo. En cambio, la capacidad sísmica residual corresponde a la energía que aún puede disipar la estructura luego de un evento sísmico, bajo el cual no se haya agotado toda su capacidad (Barlek y Galindez, 2016).

El presente estudio surge a partir de haber observado que la capital del Perú (Lima), arrastra un silencio sísmico desde 1746, lo que significa que tiene mucha energía acumulada y que en algún momento provocara un sismo de gran magnitud (Instituto Geofísico del Perú, 2019). Ante la probabilidad de la ocurrencia de un terremoto moderado o severo es necesario evaluar si las edificaciones escolares están diseñadas para soportar dichas demandas, ya que en muchas oportunidades las entidades públicas como los colegios pueden servir como refugios temporales a personas que hayan perdido sus viviendas o que hayan sido evacuadas por estar comprometida la seguridad de los edificios que ocupaban.

De lo mencionado, considerando que después de un terremoto existe una alta posibilidad de que se generen réplicas, podemos afirmar que la determinación de la capacidad sísmica residual nos permite afirmar con certeza que la estructura tendrá una respuesta eficiente ante una posible réplica, por lo tanto, se podría brindar la seguridad necesaria a los ocupantes de la edificación que en este caso particular vendrían a ser alumnos y docentes, ya que se está evaluando una edificación escolar.

El resultado de este estudio permitirá que profesionales (ingenieros) encargados de la evaluación de daños y habilitación de edificios, conozcan que tan importante es saber con certeza si las edificaciones escolares pueden seguir funcionando luego de haber sufrido daños a causa de movimientos sísmicos de gran magnitud, ya que ello sería demasiado útil al momento de decidir sobre la habitabilidad de la estructura o si se ve por conveniente la

demolición. Ambos casos podrían resultar ineficientes o incluso peligrosos cuando no se realiza el estudio de la capacidad sísmica residual de la estructura, ya que ante una decisión no certera se pondría en peligro la vida de los ocupantes o se generaría un gasto económico innecesario.

1.4 Objetivos de la investigación

1.4.1 Objetivo principal

Determinar la capacidad sísmica residual del colegio 780-POST 1997 para determinar su uso después de un evento sísmico severo empleando un análisis dinámico no lineal tiempo – historia, en la Ciudad de Lima.

1.4.2 Objetivos Específicos

- a. Analizar la estructura del colegio 780-POST 1997 frente a diversos escenarios de demandas sísmicas utilizando el método de análisis dinámico no lineal tiempo – historia para determinar su nivel de daño, en la Ciudad de Lima.
- b. Analizar los elementos estructurales del colegio 780-POST 1997 después de un evento sísmico severo para determinar su comportamiento empleando el método de análisis dinámico no lineal tiempo – historia, en la ciudad de Lima.
- c. Realizar un estudio de sismicidad para determinar la demanda sísmica de la réplica más probable considerando estudios más recientes de peligro sísmico en la Ciudad de Lima.

Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Antecedentes del Problema

2.1.1 Antecedentes Internacionales.

A continuación, se presenta algunos estudios que guardan relación con el tema de nuestra investigación.

Ufuk (2010), en su publicación “The use of post-earthquake residual displacements as a performance indicator in seismic assessment” investigo la precisión de los métodos de análisis tiempo-historia no lineal (NLTHA) de última generación para predecir la respuesta sísmica de las estructuras de concreto reforzado. Donde se evalúan las precisiones de los valores residuales y máximos previstos de los parámetros de respuesta globales y locales (por ejemplo, desplazamientos, rotaciones). Finalmente, el resultado más relevante que indica el autor consiste en que el método se puede utilizar para obtener estimaciones de la relación de deriva máxima basada en los indicadores de daño visible y en los desplazamientos residuales medidos.

Polese, Ludovico, Prota & Manfredi (2012), en su artículo denominado “Residual capacity of earthquake damaged buildings”, mencionan que el comportamiento sísmico de los edificios dañados y la relativa seguridad sísmica pueden estar adecuadamente representados por su capacidad sísmica modificada por daños denominado capacidad sísmica residual.

Los autores en la investigación citada consideran que un parámetro eficaz para representar el comportamiento sísmico de los edificios dañados es la capacidad residual definida como la aceleración espectral mínima en el período equivalente T_{eq} (la mínima aceleración máxima del suelo de anclaje) correspondiente al colapso del edificio.

Moquete (2012), sustento su tesis de maestría sobre “Evaluación del Riesgo Sísmico en Edificios Especiales: Escuelas. Aplicación a Barcelona” en la Universidad Politécnica de Catalunya, cuyo propósito fue evaluar el riesgo sísmico en edificaciones especiales (Escuelas) de Barcelona mediante técnicas avanzadas de análisis de riesgo sísmico, usando la herramienta de Sistema de Información Geográfica (SIG) para la presentación de la información y de los resultados de forma georreferenciada. El análisis del riesgo sísmico se realizó mediante el método del Índice de Vulnerabilidad (MIV), según las directrices del proyecto Risk-UE; manifestando al final que la ciudad de Barcelona se encuentra en una región de peligrosidad sísmica entre baja y moderada, lo que hace que el riesgo sísmico se deba principalmente a la

vulnerabilidad de las edificaciones. Asimismo, para un escenario de intensidad VII basada en EMS-98, los edificios de escuelas de educación primaria estudiados presentan un grado de daño medio promedio de 0.9, en la escala de 0 a 5, con considerable probabilidad de ocurrencia del grado de daño Leve. Destacando principalmente la Escola Francesc Maciá con un grado de daño medio de 3.4, con considerable probabilidad de ocurrencia de los grados de daño Moderado y Severo; y la Escola La Farigola de Vallcarca y Escola Patronat Domènech, ambas con un grado de daño medio de 2.9, y Escola Ignasi Iglésias con un grado de daño medio de 2.8, éstas tres con considerable probabilidad de ocurrencia del grado de daño Severo.

Delgado y Mantilla (2012), sustentaron la Tesis: “Estudio de vulnerabilidad y rehabilitación estructural para el edificio de secundaria y administración del colegio fundación UIS” en la Universidad Industrial de Santander; cuyo objetivo fue “evaluar la vulnerabilidad sísmica de una estructura tipo pórtico en concreto reforzado, de grupo de uso III, ubicada en el municipio de Floridablanca; y diseñar una solución de rehabilitación para actualizar la estructura según el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR – 10”; donde se concluyó que “los resultados del desempeño esperado para una demanda sísmica establecida por la Norma NSR-10, permite concluir que la estructura en su estado actual presenta una secuencia de rotulación máximo de seguridad de la vida, por lo que la edificación se puede mantener estable pero puede sufrir daños tanto en elementos estructurales en forma moderada y en elementos no estructurales en una forma severa”.

Aragón (2013), sustentó la Tesis “Evaluación sistematizada multinivel de la seguridad estructural de las edificaciones” en la Universidad Nacional Autónoma de México; cuyo objeto de estudio fue plantear un método teórico de evaluación de la seguridad estructural de inmuebles existentes sustentados en el análisis de la capacidad resistente de un edificio y su comportamiento ante sismo con base en su marco de diseño y sus características mecánicas; concluyendo que la metodología es conservadora en sus niveles básico e intermedio y presenta

una gran dispersión en los niveles detallado y avanzado, por lo que se calibrar estos últimos niveles a través de modelos informáticos o apoyándose en el análisis de estructuras reales para obtener más datos al respecto y ajustar los procedimientos planteados, ya sea por medio de factores correctivos o replanteando la metodología de alguno de los niveles de evaluación.

Barlek (2015), sustentó la Tesis “Capacidad sísmica residual de columnas de hormigón armado” en la Universidad Nacional de Tucumán, cuyo propósito fue determinar los factores de reducción de la capacidad sísmica y los índices de capacidad sísmica residual basados en la respuesta sísmica de los dos especímenes seleccionados. Para ello, se elaboraron modelos numéricos con distinto nivel de refinamiento con el fin de reproducir el comportamiento histerético de las columnas; manifestando al final que, de acuerdo a los resultados y conclusiones obtenidas, los modelos numéricos de las columnas tuvieron, una buena aproximación a los resultados obtenidos de los ensayos. Asimismo, los factores de reducción de la capacidad (n) calculados con los modelos numéricos mostraron concordancia con los obtenidos de los resultados de los ensayos y resultaron similares a los valores especificados por la norma japonesa.

Marder (2018), desarrollo un estudio sobre: “Post-Earthquake Residual Capacity of Reinforced Concrete Plastic Hinges” en la Universidad de Auckland, cuyo objetivo fue mejorar el conocimiento sobre la capacidad residual y reparabilidad de rótulas plásticas moderadamente dañadas después de un terremoto, con énfasis en rotulas plásticas típicas de estructuras modernas de concreto reforzado, ya que después del terremoto de Canterbury y Kaikoura en New Zealand muchos edificios fueron demolidos a pesar de ser relativamente modernos y haber exhibido solo niveles modestos de daño; donde a manera de conclusión determino que los resultados de los estudios experimentales han demostrado que los ciclos de carga y descarga con grandes demandas de deriva pueden tener un impacto perjudicial importante en el rendimiento de las rótulas plásticas. Asimismo, los datos de las probetas de vigas del programa

experimental se utilizaron para mostrar que los anchos de las grietas residuales dependen de las deformaciones residuales, que a su vez dependen del historial de carga, la carga axial y el nivel de restricción al alargamiento axial. Por lo tanto, los anchos de fisuras residuales no necesariamente son indicativos de las demandas de rotación máxima impuestas a una rótula plástica, aunque tal relación se obtendría si se usaran datos de experimentos cíclicos estándar. Finalmente se determinó que la inyección de epoxi es un método de reparación eficiente para reforzar daños moderados de rotulas plásticas, ya que permite restaurar la rigidez de las vigas a un mínimo del 80% de su rigidez secante original para ceder, no obstante, en la muestra de columna única reparada con epoxi se logró una restauración de rigidez considerablemente menor.

Maeda, Alwashall & Matsukawa (2019), en su investigación “An overview of post-earthquake damage and residual capacity evaluation for reinforced concrete buildings in Japan” desarrollaron un método preciso y practico de evaluación de daños posteriores al terremoto. Dicho método describe el estado del arte de los daños posteriores al terremoto y la capacidad sísmica residual para edificios de concreto reforzado en Japón. Asimismo, se discutieron el concepto y los datos de apoyo de Índice de capacidad sísmica residual (R), encontrando una buena concordancia entre el índice de capacidad sísmica residual, el índice R y los niveles de daño observados de los edificios de concreto reforzado en terremotos severos recientes.

2.1.2 Antecedentes Nacionales.

Chancón y Paz (2016), sustentaron la Tesis “Análisis de desempeño sísmico de los edificios escolares típicos 780 post 1997 de la costa peruana”; cuyo propósito fue mejorar las funciones de vulnerabilidad existentes de locales escolares 780 post 1997 en términos de pérdidas económicas mediante el PBBE; concluyendo que los edificios escolares 780 post 1997 de dos y tres niveles presentan pérdidas bajas hasta una intensidad de 1.5g de pseudoaceleración. Estos edificios entran en el rango de irreparabilidad aproximadamente en valores cercanos a 2.5g.

Por lo tanto, se concluye que tienen un buen desempeño sísmico frente a sismos raros y cumplen satisfactoriamente la filosofía del diseño sismorresistente según la norma E.030.

Huapaya (2017), sustentó la Tesis “Evaluación de los indicadores de comportamiento sísmico de edificios con sistema aporticado a través del método estático no lineal” cuyo objetivo principal fue evaluar la sobre resistencia y ductilidad para edificios aporticados mediante el método estático no lineal y comparar su capacidad con la demanda propuesta en la norma E030; concluyendo que el valor de la sobre-resistencia Ω , es dependiente del periodo fundamental de la estructura. A medida que el periodo fundamental de la estructura aumenta, dicho valor de Ω aumenta consigo también. Asimismo, se determinó que el valor del factor de ductilidad μ , es dependiente del periodo fundamental de la estructura. A medida que el periodo fundamental de la estructura aumenta, dicho valor de μ disminuye a razón de una ecuación polinómica.

Diaz et al., (2018), desarrollaron un estudio denominado: “Experimental study of three retrofitting techniques for typical school buildings in Perú”; cuyo objetivo principal fue conocer el comportamiento sísmico mediante pruebas de carga cíclica lateral y comparar los resultados experimentales de tres técnicas de reacondicionamiento para mejorar la capacidad sísmica de Edificios escolares típicos del Perú, denominados módulo 780; llegando a la conclusión de que la técnica ACMAC realizó la mayor disipación de energía en este estudio experimental, que fue mejorado con el incremento de pernos en las conexiones entre columnas de concreto armado y marcos de acero insertados. Las muestras adaptadas con la técnica ACMAC tuvieron un mejor comportamiento sísmico que las adaptadas con técnicas MARM e IMACA.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Sismología

La sismología es una rama que pertenece a la geofísica cuyo objeto de estudio son los sismos y propiedades elásticas de la tierra. La información que utiliza son las propiedades de las ondas sísmicas que se propagan en el interior de la Tierra y que son registradas por las estaciones sísmicas que frecuentemente constituyen redes de monitoreo (IGP, 2012).

Los sismos son fenómenos naturales que se producen a partir de la generación y liberación de energía para posteriormente propagarse en forma de ondas por el interior de la tierra. Al llegar a la superficie, estas ondas son registradas por las estaciones sísmicas y percibidas por la población y por las estructuras (IGP, 2012).

El Perú forma parte del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que es considerado uno de los países con mayor potencial sísmico. La actividad sísmica se genera principalmente por el proceso de subducción de las placas de Nazca y Sudamericana, dando lugar a sismos de gran magnitud que podrían llegar a ser destructores si se producen a niveles superficiales (Bernal y Tavera, 2002).

2.2.1.1 Origen de los sismos

Los sismos son originados por la ruptura y fraccionamiento de las rocas en las capas más exteriores de la tierra. Dicho acontecimiento conlleva a la liberación de energía en el medio circundante y es transmitida como ondas elásticas llamadas “ondas sísmicas” que se propagan por el interior y la superficie de la tierra (Tavera, 1993). Las zonas de subducción forman parte de las placas tectónicas donde las placas convergen y una placa se desliza debajo de la otra. Este fenómeno produce aceleraciones en la superficie terrestre generando posibles daños estructurales en las edificaciones.

Las aceleraciones son registradas por instrumentos especiales (sismógrafos, acelerógrafos, etc.), los cuales son empleados para analizar el comportamiento estructural de las edificaciones frente a posibles movimientos sísmicos.

Tabla 1

Principales características de los sismos más importantes del Perú

Magnitud Ms	Lima 1746	Lima 1940	Lima 1940	Lima 1966	Ancash 1970	Lima 1974
	8.1	8.2	7.9	7.7	7.9	7.9
Intensidad máxima (MM)	X- XI	XI	VII-VIII	VIII	VIII-IX	VIII-IX
Altura de Ola Tsunami	15-20	20	3	2.5	-	1.6

Nota: Adaptado de “Riesgo sísmico de edificios peruanos”, (p.3), por, por Alejandro Muñoz, Marcos Tinman, Daniel Quiun, (s.f.).

2.2.2 Demanda

Cuando se quiere evaluar el daño sísmico esperado de una estructura usando la metodología basada en el espectro de capacidad se puede representar el peligro sísmico con fines de ingeniería estructural.

Para cuantificar el peligro sísmico primero se debe verificar los valores máximos del movimiento del terreno y en seguida establecer niveles de amenaza en términos de probabilidades. Finalmente, se busca la forma de representar las sollicitaciones sísmicas sobre la estructura mediante espectros de demanda.

2.2.3 Análisis estático no lineal

El análisis estático no lineal se realizó a través de la aplicación de cargas incrementales en sentido positivo y negativo de la dirección X y de la dirección Y, considerando una distribución de carga modal de acuerdo a las recomendaciones del ATC-40.

2.2.3.1 Distribución de carga lateral de las fuerzas sísmicas

La carga lateral estática que representa la fuerza del terremoto se aplica en el centro de gravedad de cada piso. Considerando así, de acuerdo a las recomendaciones del ATC-40 una distribución de carga modal.

La distribución de carga modal está definida de la siguiente manera:

$$F_i = Q_B \left(\frac{w_i \phi_{1,i}}{\sum_{j=1}^n w_j \phi_{1,i}} \right)$$

Donde:

$\phi_{1,i}$: Componente de la primera distribución de modo en la i – ésimo piso.

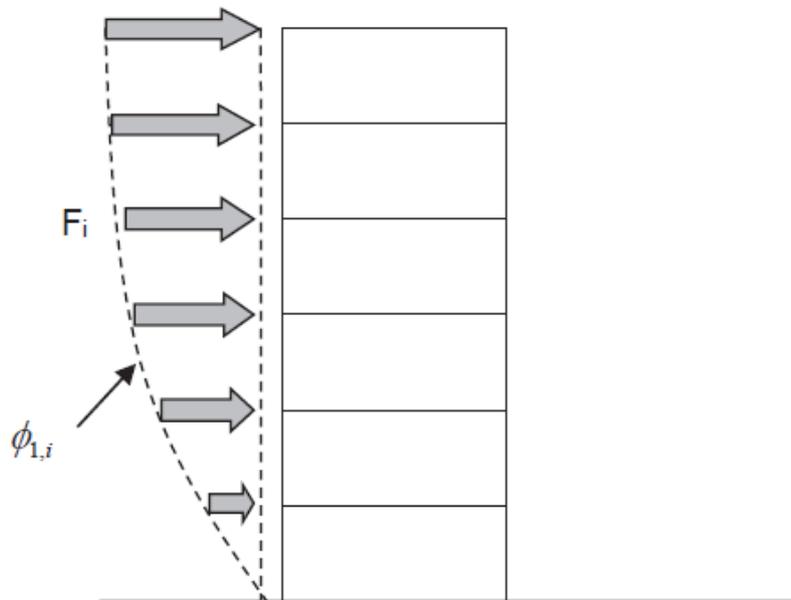


Figura 1. Distribución modal. Adaptado de “Technical Manual Version 6.4”

Fuente: Manual del STERA3D. (s.f.)

2.2.3.2 Curva de capacidad

El software “STERA 3D” proporciona el menú en el análisis estático para mostrar la Curva de capacidad basada en la siguiente fórmula (Kuramoto et. al, 2000):

$$S_a = Q_B \frac{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^2}{(\sum_{i=1}^n m_i \delta_i)^2}, \quad S_d = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^2}{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i} \quad (a)$$

Donde:

m_i : Masa agrupada en el i –ésimo piso.

δ_i : Componente de la distribución del desplazamiento de piso no lineal en el i –ésimo piso.

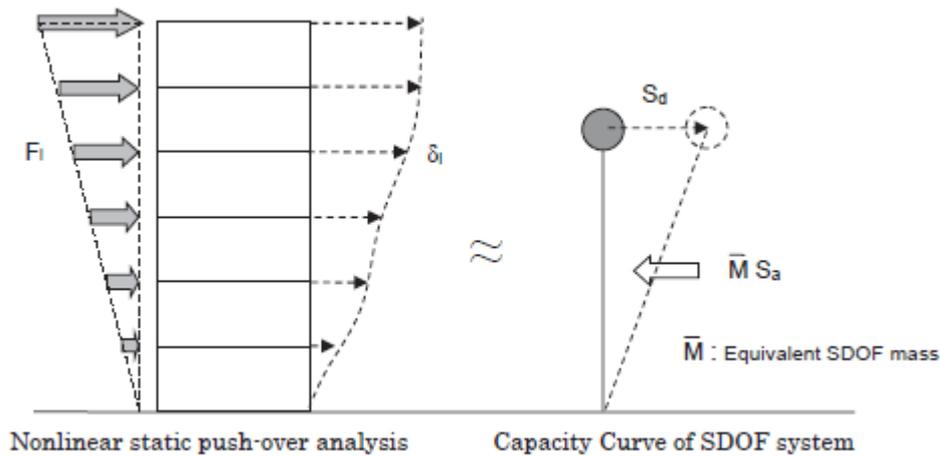


Figura 2. Curva de capacidad del sistema SDOF equivalente. Adaptado de “Technical Manual Version 6.4”.

Fuente: Manual del STERA3D. (s.f.)

Como se muestra esquemáticamente en la **Figura 2**, el resultado paso a paso del análisis estático no lineal (Push-over) se usa para obtener la Curva de capacidad del sistema SDOF equivalente usando la Ecuación (a).

2.2.4 Análisis dinámico no lineal tiempo - historia

Para realizar el análisis dinámico no lineal tiempo historia se han considerado siete juegos de registros sísmicos, tal como se muestra en la **Tabla 2**. Dichos registros han sido obtenidos en estaciones sobre perfiles de suelo tipo I. Para amplificar los registros se ha utilizado los criterios establecidos en la NTE E030 2018.

2.2.4.1 Consideraciones de los registros sísmicos

Para analizar la estructura se consideraron un total de siete juegos de registros sísmicos, los cuales serán denominados eventos principales. Dichos registros sísmicos fueron obtenidos en estaciones sobre perfiles de suelo tipo I, ya que el periodo de la estructura para este tipo de suelos es corto, por lo que los sismos generan mayores daños a la estructura.

La raíz cuadrada de la suma (SRSS) de las aceleraciones horizontales de los espectros han sido amplificadas hasta satisfacer las condiciones establecidas en el artículo 30.1.3 de la NTE E030 2018, como se muestra en la **Figura 3**. Las máximas aceleraciones obtenidas luego de amplificar los registros sísmicos se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2

Siete juegos de registros sísmicos usados en el análisis dinámico no lineal tiempo – historia

Registro Id.	Sismo	Estación	EW	NS	UD
			Acc(gal)	Acc(gal)	Acc(gal)
1	Lima 1966	PQR	370	575	261
2	Huaraz 1970	PQR	475	462	224
3	Lima 1974 oct	PQR	410	501	216
4	Lima 1974 nov	PQR	399	566	227
5	Iquique 2005	UJB	507	549	260
6	Pisco 2007	UNI	556	394	265
7	Tacna 2010	UJB	400	505	228

Nota: Adaptado de “Análisis sísmico del edificio administrativo del SENCICO (Pabellón A) para la elaboración de la propuesta de sensorización para la evaluación del comportamiento estructural”, (p.32), por Dr. Ing. Miguel Augusto Díaz Figueroa, 2020.

Estaciones PQR: Parque de la Reserva, UJB: Universidad Jorge Basadre Grohmann, UNI: Universidad Nacional de Ingeniería.

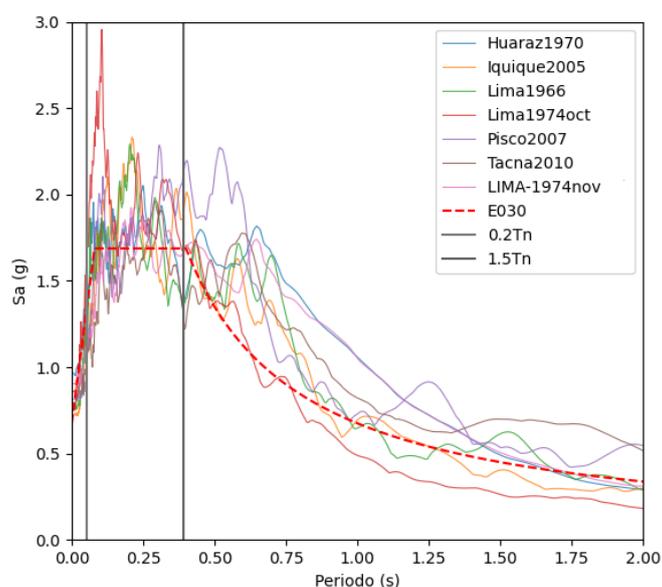


Figura 3. Espectros amplificados al espectro de diseño considerando los criterios de la NTE E030

Fuente: Elaboración propia. (2021)

2.2.4.2 Replica

Las réplicas de los terremotos pueden causar daños importantes a los edificios. Ocasionalmente, pueden provocar el colapso de un edificio. Este riesgo es más alto para edificios previamente dañados, *Figura 4*. Es necesario verificar lo antes posible los edificios

dañados por una variedad de razones de emergencia, que incluyen búsqueda y rescate, estabilización de edificios y rescate y recuperación de reparaciones. Debido a que las personas que ingresan a los edificios dañados corren el riesgo de producirse una réplica, la decisión de permitir la entrada debe considerar tanto el nivel de daño inicial como la probabilidad de que se produzcan réplicas (Ronan, Paul y Chris, 1999).

Esta referencia se muestra en la *Figura 4*.



Figura 4. Edificios como este edificio de oficinas en Kobe, Japón, son generalmente inestables y pueden colapsar en una réplica. Adaptado de “Earthquake Aftershocks – Entering Damage Buildings”.

Fuente: Ronan, Paul y Chris. (1999)

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Colegio 780 POST 1997

También conocidos como colegio 780 actual o moderno, son diseñados y construidos bajo los parámetros de la norma sismorresistente de 1997 donde los requerimientos de rigidez y las secciones de los elementos estructurales fueron incrementando. Estos módulos suelen ser típicos con algunas variaciones entre la costa, sierra y selva (Chancón y Paz, 2016).

2.3.2 Daño sísmico

El daño es el grado de degradación o destrucción causado por un fenómeno peligroso; en este caso terremotos; sobre las personas, los bienes, los sistemas de prestación de servicios y los

sistemas naturales o sociales. Pero desde el punto de vista estructural, generalmente es relacionado con deformaciones irreversibles en la estructura (deformación inelástica), por lo tanto, cualquier cantidad de daño debe ser preferiblemente asociada a un cierto aporte de deformación (Safina, 2002).

2.3.3 Análisis tiempo – historia

El análisis Tiempo - Historia se utiliza para determinar la respuesta sísmica de una estructura bajo carga dinámica de terremoto representativo (Wilkinson y Hiley, 2006).

2.3.4 Capacidad sísmica

La capacidad sísmica de una estructura es la energía total que la misma es capaz de disipar durante un sismo (Barlek y Galindez, 2016).

2.3.5 Capacidad sísmica residual

La capacidad sísmica residual corresponde a la energía que aún puede disipar la estructura luego de un evento sísmico, bajo el cual no se haya agotado toda su capacidad (Barlek y Galindez, 2016).

Capítulo III: Hipótesis y Variables

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

La capacidad sísmica residual del colegio 780-POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima indica que la edificación escolar puede seguir siendo usado después de un evento sísmico severo.

3.1.2 Hipótesis Específicas

- a. El análisis estructural del colegio 780-POST 1997 ubicado en la ciudad de Lima indica que se encuentra en un nivel de daño alto frente a demandas sísmicas severas.
- b. Los elementos estructurales del colegio 780-POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima muestran un comportamiento eficiente durante un evento sísmico severo.

- c. El estudio de sismicidad indica que existe una alta probabilidad de que ocurra una réplica con una demanda sísmica moderada en la Ciudad de Lima tras un gran terremoto.

3.2 Identificación de las Variables

3.2.1 Objeto de estudio

- ✓ El colegio 780-POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima.

3.2.2 Variables a estudiar

- ✓ Variable independiente X: Capacidad sísmica residual.
- ✓ Variable dependiente Y: Uso del colegio 780-POST 1997.

Tabla 3

Definición conceptual de las variables

Definición conceptual	
Capacidad sísmica residual	Uso del colegio 780-POST 97
Según Barlek y Galindez (2016), “la capacidad sísmica residual es la energía que aún puede disipar la estructura luego de un evento sísmico, considerando que no ha agotado toda su capacidad”.	Según Choncón y Paz (2017), “los edificios 780-POST 1997 son edificaciones escolares modernas que se utilizan para oficinas, bibliotecas y laboratorios que albergan alumnos y docentes”.

Nota: Elaboración propia, 2021.

3.3 Operacionalización de las Variables

En la **Tabla 4** se muestran la operacionalización de las variables mostrados en la **Tabla 3**.

Tabla 4

Operacionalización de las variables

Variables	Dimensiones	Indicadores	Tipo
Capacidad sísmica residual	Análisis estático no lineal (push-over)	- Curva de capacidad	Independiente
	Análisis dinámico no lineal tiempo – historia	- Registros sísmicos más representativos. - Desempeño de la estructura.	
Uso de colegio 780–POST 1997	Estado de daño	- Despreciable - Ligero - Moderado - Severo	

	- Completo
	- Totalmente operacional
	- Operacional
	- Seguridad
	- Pre-colapso
	- Colapso
Nivel de desempeño	

Nota: Elaboración propia, 2021.

Capítulo IV: Metodología

4.1 Tipo y Diseño de Investigación

4.1.1 Tipo de Investigación

El tipo de investigación según el objeto de estudio fue explicativo porque:

Los estudios explicativos tratan de encontrar una explicación del fenómeno en cuestión, para lo cual buscan establecer, de manera confiable, la naturaleza de la relación entre uno o más efectos o variables dependientes y una o más causas o variables independientes” (Cazau, 2006, p.28).

Esta investigación también presentó un estudio no experimental, debido que “la hipótesis se verificará sin manipular deliberadamente las variables, es decir, no se hará variar intencionalmente las variables independientes. Por el contrario, lo que se realizará es observar fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlos (...)” (Hernandez, Fernandez y Baptista, 2012). Asimismo, la investigación fue de tipo cuantitativa, debido que se usó magnitudes numéricas, a través de la recolección de datos los cuales fueron analizados y verificados para probar que cumplan las respectivas hipótesis.

4.1.2 Diseño de Investigación

En primer lugar, se recabo información sobre los colegios típicos del Perú denominados 780 POST 1997, los cuales fueron estudiados por diferentes investigadores, tales como: León y Quintana, 2004; Chancón y Paz, 2016; entre otros. Teniendo en cuenta dicha información se inició el desarrollo de la presente investigación.

En segundo lugar, se plantean dos tipos de análisis: el análisis estático no lineal y el análisis dinámico no lineal tiempo historia empleando el software STERA3D V10.8. El primer método de análisis nos permite determinar la curva de capacidad de la estructura, posteriormente, se

seleccionó un juego de siete registros sísmicos, los cuales se escalaron teniendo en cuenta los criterios de la NTE E030. Dichos registros sísmicos se duplicaron en un intervalo de 10 segundos para simular las réplicas. Teniendo en cuenta los registros sísmicos obtenidos y empleando el segundo método de análisis, se determinó las respuestas sísmicas y los desplazamientos residuales de la edificación escolar, tanto en la dirección longitudinal como en la dirección transversal.

Finalmente, se procedió a procesar la información obtenida mediante el programa STERA3D V10.8, con la finalidad de entender los objetivos, responder las preguntas de investigación y validar las hipótesis.

4.2 Población y Muestra

4.2.1 Población

La población de estudio está formada por colegios típicos del Perú ubicados en la Ciudad de Lima, denominados 780-POST 1997 que son empleados para oficinas, bibliotecas y laboratorios.

4.2.2 Muestra

En esta investigación se utilizó un muestreo no probabilístico, en donde se tomó en cuenta la opinión de un Ingeniero experto en el campo para hallar el tamaño de la muestra. Para luego determinar una población conformada por colegios típicos del Perú ubicados en la Ciudad de Lima, de los cuales haciendo uso del método de juicio por experto se seleccionó un colegio típico del Perú de dos niveles denominado 780 POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima. Finalmente, este fue analizado para entender los objetivos, responder las preguntas de investigación y validar las hipótesis.

4.3 Técnicas e Instrumentos de Investigación

4.3.1 Técnicas

La técnica que se utilizó para esta investigación fue por observación directa de los eventos y toma de datos, usando como herramienta de procesamiento y análisis de datos un programa computacional especializado en el análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal tiempo - historia. Esta técnica nos permitió realizar una descripción detallada y sistemática del comportamiento del objeto en estudio, el cual nos permitió finalmente validar las hipótesis.

4.3.2 Instrumentos

Los recursos a emplear para la recolección de datos fueron:

- ✓ Planos
- ✓ Fotografías
- ✓ Informes
- ✓ Tesis
- ✓ Artículos
- ✓ Lista de datos de registros sísmicos.
- ✓ Monitoreo computacional mediante software de la curva de capacidad y las respuestas sísmicas de la estructura de análisis.
- ✓ Manejos de software STERA3D V10.8.

4.4 Procedimiento de Recolección de Datos

Para evaluar la estructura del colegio 780 POST 1997 se plantearon dos tipos de análisis: el análisis estático no lineal y el análisis dinámico no lineal tiempo – historia. Dicho análisis se realizó empleando el software STERA3D V10.8, del cual se tomó la data necesaria para luego poder analizarlos y validar las hipótesis acordes a sus indicadores propuestos en la definición de variables.

Capítulo V: Análisis y Discusión de Resultados

5.1 Zona de estudio

Para determinar la zona de estudio se tuvo en cuenta la investigación realizada por Pulido et al. (2015), en donde analiza un modelo de fuentes de escenario y fuertes movimientos de la superficie terrestre para futuros mega-terremotos en Lima. A partir de ello, se determinó realizar el análisis de la estructura en el Distrito de San Luis, considerando que es una zona vulnerable a acciones sísmicas severas y tiene una mayor densidad de centros educativos por cada 1000 habitantes.

5.1.1 Pulido

Pulido et al. (2015), realizó estudios sobre movimientos de la superficie terrestre para un sismo extraordinarios de 8.8 Mw que se espera en Lima y Callao. Donde se analizó un conjunto de fuertes movimientos de tierra en Lima para 108 escenarios de ruptura de fallas, y efectos de sitio incorporados extraídos de las encuestas de microtemores realizadas en representativas zonas geotécnicas en Lima Metropolitana.

Para todos los escenarios planteados en Lima, el promedio de PGA y PGV alcanzan 700cm/s^2 y 70cm/s , respectivamente, pero estos valores pueden ser tan grandes como 1000cm/s^2 y 100cm/s para movimientos de suelo, lo que significa que la desviación estándar está por encima de la media. Estas amplitudes de movimiento del suelo son comparables a las intensidades inferidas para Lima durante el gran terremoto de 1746 (MMI ~ IX). (Pulido, 2015).

Los resultados obtenidos indican que el promedio de PGA y PGV en Lima Central (sitio de suelo duro), para las simulaciones realizadas son aproximadamente 2 a 3 veces mayor que los valores observados durante el terremoto de 1974 y 1966 (8.0 Mw). Los valores espectrales simulados en el centro de Lima son tan grandes como cuatro veces a los valores observados durante el terremoto de 1974 y 1966. (Pulido, 2015).

Los valores de los espectros de respuesta de pseudoaceleración promedio para Lima obtenidas en este estudio están por encima de 1.5 g para períodos alrededor de 0,3 segundos, para áreas amplias dentro de la ciudad. Esto podría ser un tema crítico en términos de daños si un terremoto de similares características afectara a Lima, teniendo en cuenta que los colegios típicos en Lima Metropolitana son generalmente de mampostería de baja a media altura (Pulido, 2015).

5.1.2 Distrito de San Luis

Según el Centro Peruano-Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, el Distrito de San Luis es uno de los 43 distritos de la Provincia de Lima y cuenta con una superficie de 3.49 km² con una altitud de 175 msnm y una población censada (2007) de 54,634. Asimismo, tiene los siguientes límites:

- ✓ Por el Este con el distrito de Ate (principales vías limitantes Av. Nicolás Ayllón – Av. Las Torres – Av. Circunvalación).
- ✓ Por el Oeste con el distrito de La Victoria (principales vías limitantes Av. Nicolás Arriola – Av. Aviación – Av. Circunvalación)
- ✓ Por el Norte con el distrito de El Agustino (principales vías limitantes Jr. Garcilaso de la Vega – Jr. Ollanta).
- ✓ Por el Sur con el distrito de San Borja (principales vías limitantes Av. Canadá – Jr. Urdanivia – Jr. Hualgayoc).

5.1.2.1 Zonificación

De acuerdo al mapa de Microzonificación Sísmica - Geotécnica para Lima Metropolitana y Callao elaborado por el (CISMID, 2015 e IGP, 2010), según la Norma E.030, el Distrito de San Luis pertenece a la zona I y tipo de suelo S1.

5.1.2.2 Peligro por sismo

Teniendo en cuenta la zonificación de suelos propuesta por el CISMID (2015), se elaboró el mapa de peligro por sismo para Lima Metropolitana y Callao, donde se establecieron niveles de peligro sísmico desde Bajo, Medio, alto hasta Muy Alto. En el cual se puede observar que el Distrito de San Luis pertenece al Nivel de Peligro por sismo Medio.

5.1.2.3 Vulnerabilidad

Los estudios de vulnerabilidad realizados utilizando las metodologías propuestas por CENEPRED e INDECI (2015) muestran en el mapa síntesis de vulnerabilidad para Lima Metropolitana y Callao que el Distrito de San Luis se encuentra en el Nivel de Vulnerabilidad entre Medio y Alto.

5.1.2.4 Instituciones educativas

El portal digital de compra y arriendo de inmuebles de América Latina, realizó una investigación para identificar la cantidad de centros educativos (privados y públicos) en cada uno de los Distritos de Lima, en donde se obtuvo como resultado que los Distritos de Barranco, San Luis y Los Olivos cuentan con mayor densidad de centros educativos por cada 1000 habitantes.

Las edificaciones esenciales tales como colegios podrían ser utilizados como refugios temporales de las personas damnificadas después de un evento sísmico severo, es por esa razón que surge la necesidad de conocer aproximadamente su respuesta sísmica. Ante la problemática, en la presente investigación se vio por conveniente evaluar un colegio típico denominado 780 POST 1997, considerando los parámetros de suelo del Distrito de San Luis según el mapa de Microzonificación Sísmica – Geotécnica, ya que dicho distrito cuenta con una mayor densidad de centros educativos, se encuentra en un nivel de riesgo sísmico medio y la tipología estructural de los colegios se asemejan a la estructura de análisis.

5.2 Descripción del edificio

En el presente trabajo de investigación se plantea analizar y determinar la capacidad sísmica residual de un colegio típico del Perú de dos niveles denominado 780-POST 1997, también conocido como colegio 780 actual o moderno, el cual se diseñó y se construyó bajo los lineamientos de la norma sismorresistente de 1997 donde los requerimientos de rigidez fueron incrementados. Por dicha razón, a partir de ese año se construyeron edificios escolares con elementos estructurales con secciones más grandes. Estos módulos suelen ser típicos con algunas variaciones entre la costa, la sierra y la selva (Chancón, 2016).

De acuerdo a los planos se puede apreciar que el edificio 780 moderno es de dos niveles y tiene un sistema estructural conformado por pórticos de concreto y muros de albañilería de planta rectangular, siendo las dimensiones en planta de 23.65 m de largo y 7.90 m de ancho, a su vez, tiene un área techada de 424 m² y 3 aulas por cada nivel, los cuales serán empleados para oficinas, bibliotecas y laboratorios. La altura de piso es de 3.35 m y para subir al segundo piso existe una escalera independiente al costado del módulo (León y Quintana,2004).



Figura 5. Módulo típico del colegio 780 POST 97.

Fuente: León y Quintana. (2004)

5.2.1 Elementos estructurales

La estructura está conformada por columnas, vigas, muros de albañilería confinada y losas aligeradas. En la dirección longitudinal existen dos pórticos de concreto (ejes A y B). Las

columnas son de sección rectangular y en T. La *Figura 6* y la *Figura 7* muestran los planos del nivel 01 y el nivel 02.

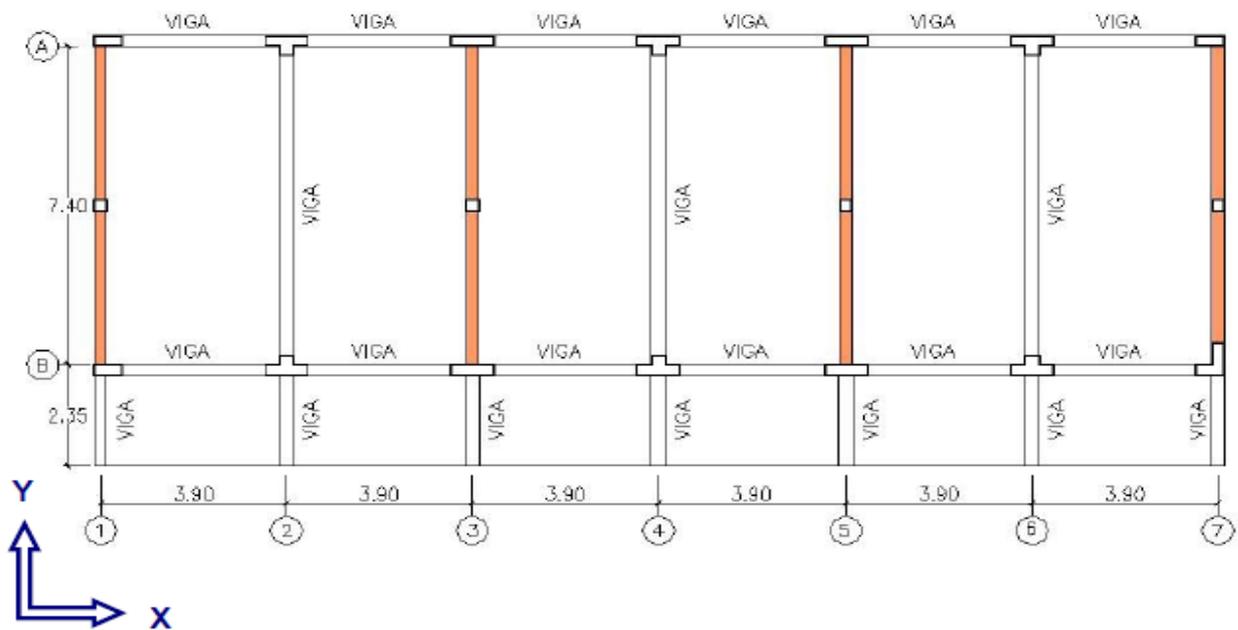


Figura 6. Plano en planta nivel 01.

Fuente: León y Quintana. (2004)

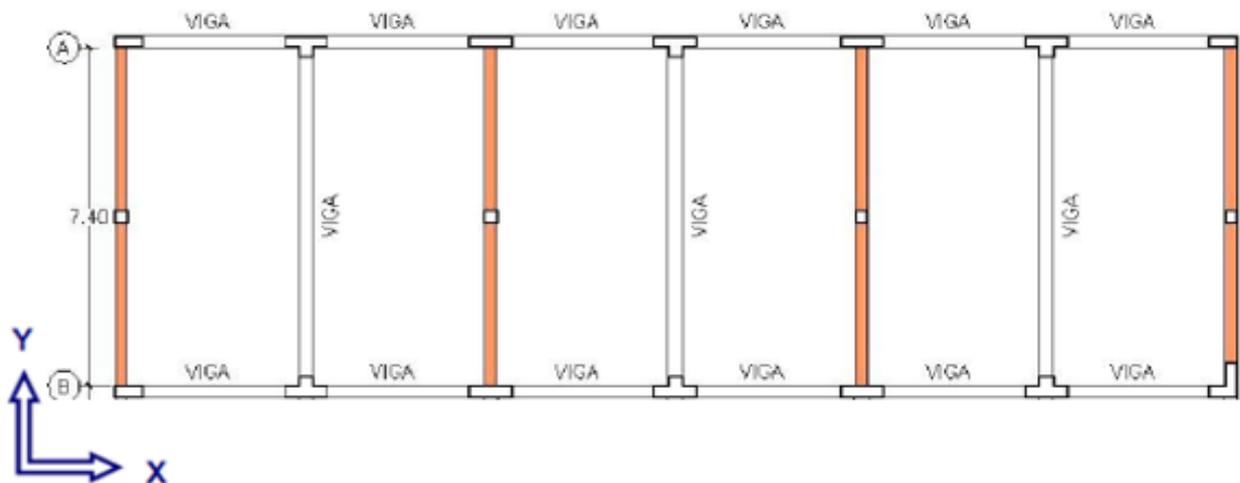


Figura 7. Plano en planta nivel 02.

Fuente: León y Quintana. (2004)

En los ejes 1, 3, 5 y 7 de la dirección transversal existen muros de albañilería de 25 cm de espesor, que separan los salones y están confinados por columnas y vigas rectangulares. Los ejes 2, 4 y 6 están constituidos por pórticos formados por columnas en T y vigas rectangulares. (León y Quintana,2004).

5.2.1.1 Columna

Como se puede apreciar en el plano de la *Figura 6*, existen columnas de sección T, el cual no se puede modelar en el programa STERA3D V10.8, ante esa dificultad se vio por conveniente realizar una equivalencia de columna T a columna rectangular, ya que el programa solo permite modelar columnas rectangulares.

Para realizar la equivalencia de las columnas se tuvo en cuenta principalmente el diagrama de iteración y el diagrama de momento curvatura de las secciones, buscando que se asemejen

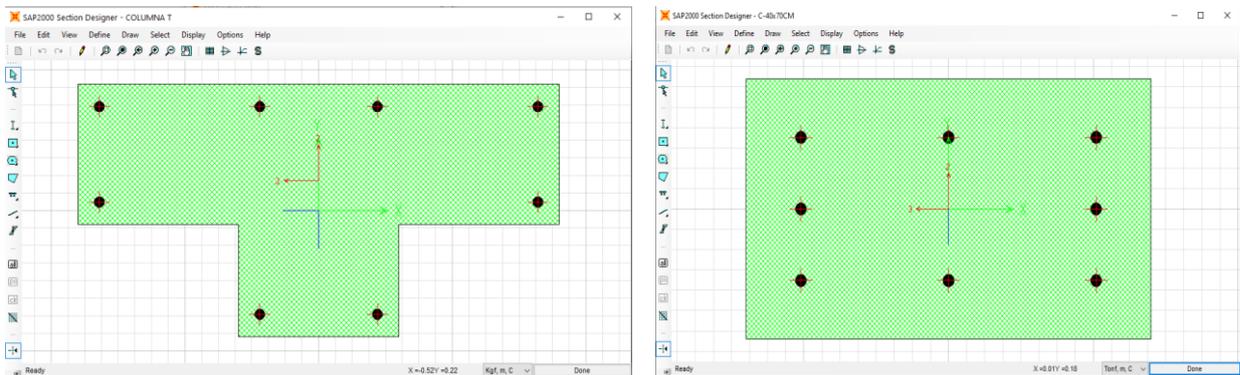


Figura 8. Modelo de equivalencia de columna T a columna rectangular.

las propiedades de resistencia y disminuyendo un valor mínimo a las propiedades de resistencia de la columna equivalente.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

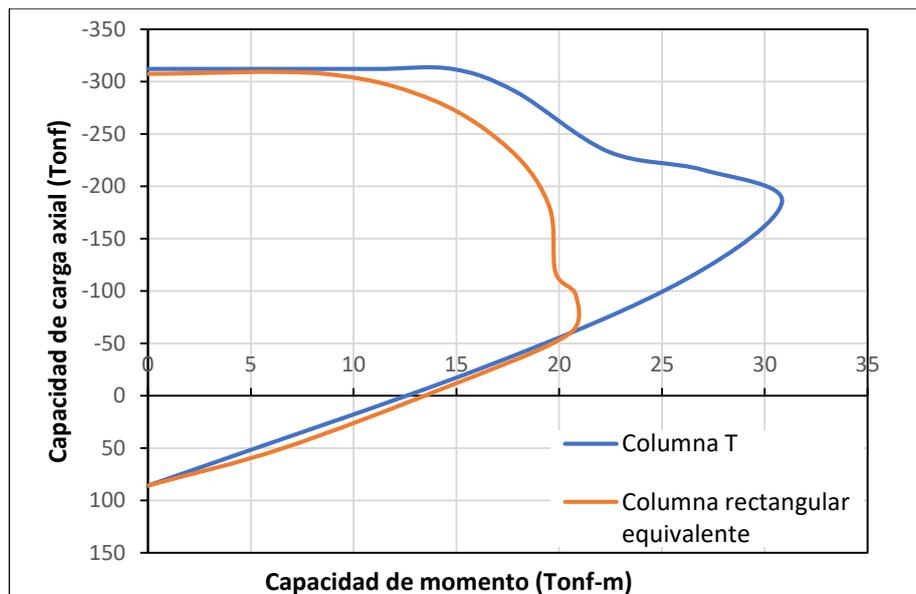


Figura 9. Diagrama de interacción de columna.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

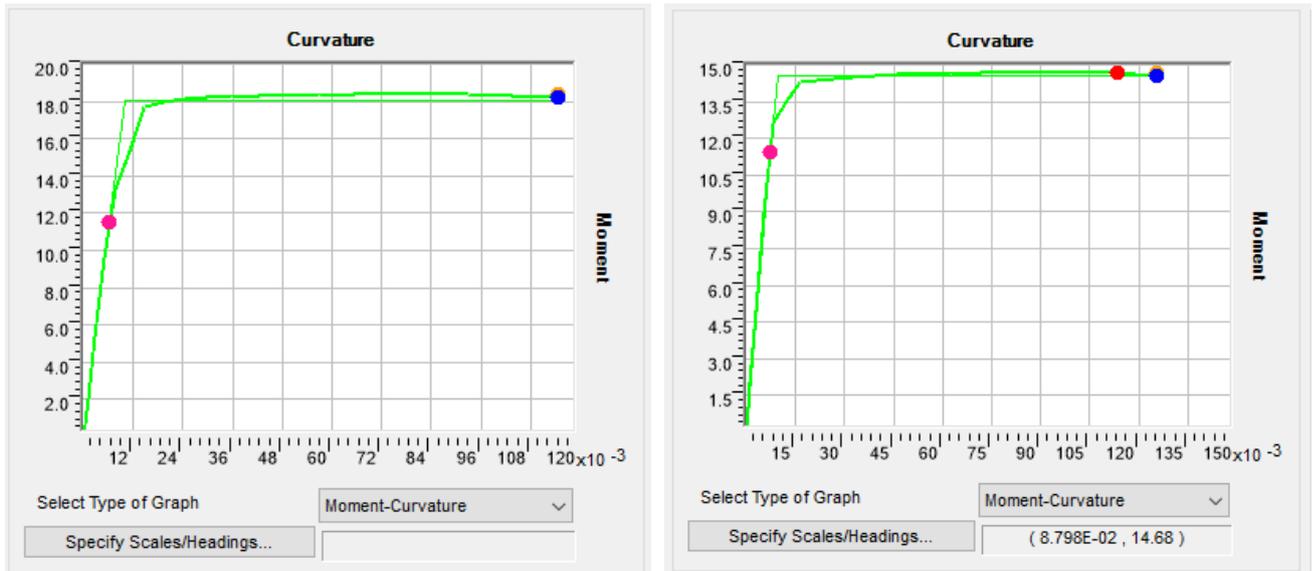


Figura 10. Diagrama de momento curvatura de la columna T y de la columna equivalente rectangular respectivamente en la dirección más corta.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

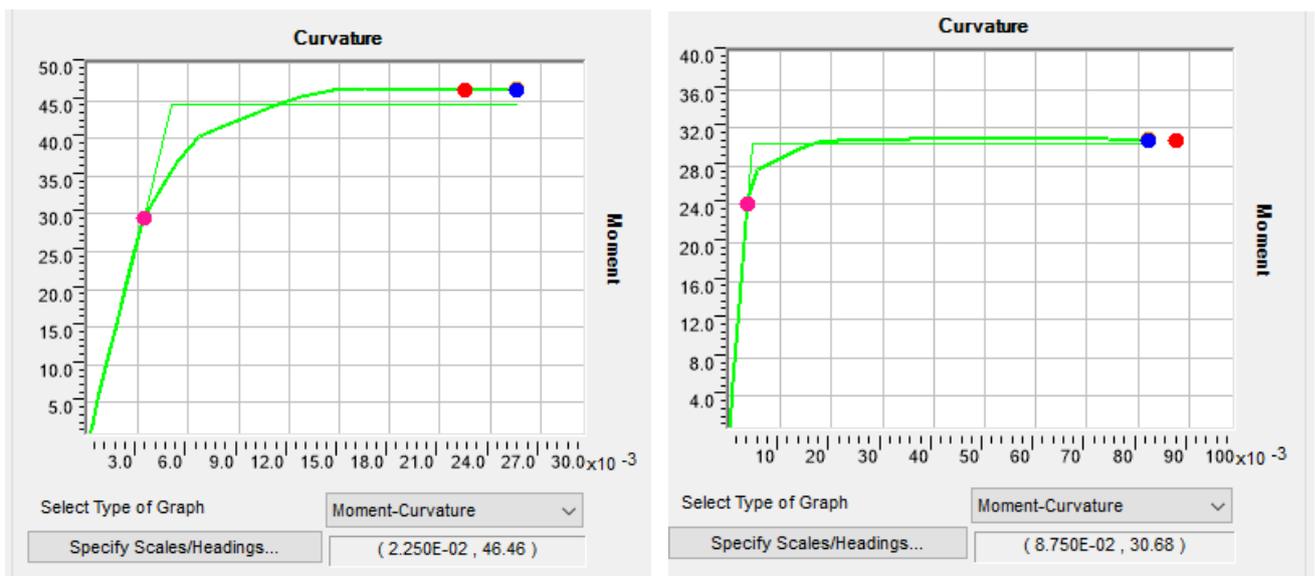


Figura 11. Diagrama de momento curvatura de la columna T y de la columna equivalente rectangular respectivamente en la dirección más larga.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

La **Figura 12**, muestra las secciones transversales de los tres tipos de columnas.

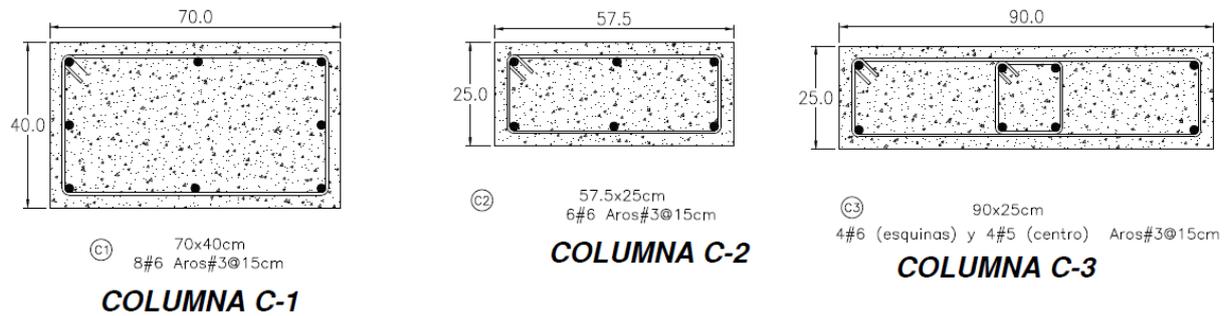


Figura 12. Secciones típicas de las columnas.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

5.2.1.1 Vigas

Las vigas son rectangulares de 0,25m x 0,55m en los dos pisos del eje A y de 0,25m x 0,70m en los dos pisos del eje B. La **Figura 13** muestra las secciones transversales de las vigas.

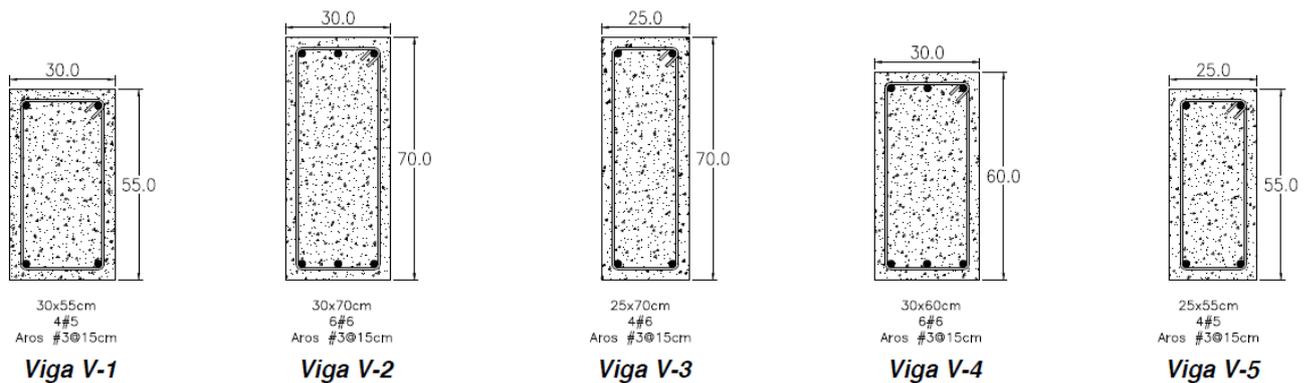


Figura 13. Secciones típicas de las vigas.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

5.2.1.1 Muro de albañilería

En los ejes 1, 3, 5 y 7 de la dirección transversal existen muros de albañilería de 25 cm de espesor, que separan los salones y están confinados por columnas y vigas rectangulares. Los ejes 2, 4 y 6 están constituidos por pórticos formados por columnas en T y vigas rectangulares.

Para analizar el comportamiento inelástico de los muros de albañilería se idealizaron como amortiguadores pasivos y se tuvo en cuenta la referencia: Diaz, M., et al., (2019). "Development of analytical models for confined masonry walls based on experimental results in Lima city", el cual se basa en resultados experimentales para la construcción de la curva de

capacidad del muro de albañilería en análisis, de donde se obtuvo los siguientes parámetros de análisis:

Degrading Trilinear Hysteresis	
Stiffness (kN/mm)	
K0	323
Stiffness ratio	
K1 / K0	0.279
K2 / K0	0.011
K3 / K0	-0.25
Force (kN)	
Fc	650
Fy	1000
Fu	1110
Hysteresis control parameters	
Stiffness Degrading Ratio [0, 1]	0.48
Slip Stiffness Ratio [0, 1]	0.44
Strength Degrading Ratio [0, 1]	0.02
OK	

Figura 14. Parámetros de análisis inelástico de la albañilería.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

Teniendo en cuenta dichos parámetros se obtuvo la curva de capacidad de los muros de albañilería, tal como se muestran a continuación.

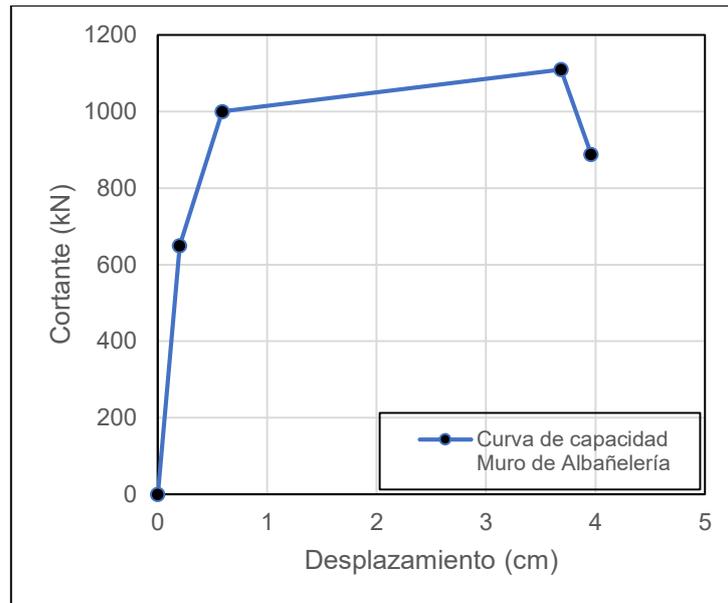


Figura 15. Curva de Capacidad - Muro de albañilería.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

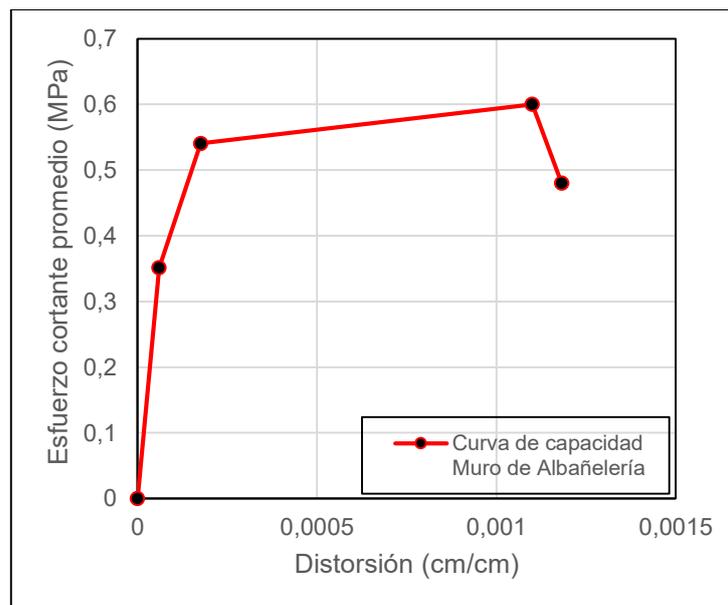


Figura 16. Curva de Capacidad - Muro de albañilería.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

5.3 Propiedades de los materiales

Las propiedades de los materiales han sido tomadas de los planos estructurales proporcionados por terceros, ya que no es alcance de este estudio determinar las propiedades mecánicas de los materiales, por lo que se asumió los valores considerados en los planos, las normas de

edificaciones vigentes para la elaboración del modelo matemático y los valores recomendados en otros estudios.

5.3.1 Concreto

La resistencia a compresión del concreto armado existente ha sido considerada tomando los valores señalados en los planos, $f'_c = 210kg/cm^2$.

5.3.2 Acero de refuerzo

Las varillas de refuerzo de acero están catalogadas como ASTM A615 grado 60. Teniendo una resistencia a la fluencia de $f_y = 4200kg/cm^2$.

5.3.3 Albañilería

La resistencia a compresión de albañilería para muros con unidades King Kong considera $f'_m = 35kgf/cm^2$.

Las propiedades de los muros de albañilería se obtuvieron de acuerdo a las consideraciones de los planos. Asimismo, todas las unidades de albañilería cuentan con dimensiones de 13cm x 24cm x 9cm y están confinadas por vigas y columnas.

✓ Mortero (1:4): $f_{cb} = 14.2 Mpa$

✓ Albañilería: $f'_m = 35 kg/cm^2$

Los valores de las propiedades de la degradación de la histéresis trilineal se consideraron teniendo en cuenta los ensayos realizados a muros de albañilería por el CISMID.

✓ Rigidez: $K_0 = 323kN/mm$

✓ Relación de rigidez: $\frac{k_1}{k_0} = 0.279, \frac{k_2}{k_0} = 0.011, \frac{k_3}{k_0} = -0.25$

✓ Fuerza:

- $f_c = 650 kN$

- $f_y = 1000 kN$

- $f_u = 1110 kN$

- ✓ Parámetros de control de histéresis:
 - Relación de degradación de la rigidez: 0.48.
 - Relación de rigidez de deslizamiento: 0.44.
 - Relación de degradación de la fuerza: 0.02.

5.4 Análisis inelástico del colegio 780 POST 1997

Para evaluar la estructura se plantean dos tipos de análisis: el análisis estático no lineal y el análisis dinámico no lineal tiempo historia.

5.4.1 Descripción del modelo computacional

Teniendo en cuenta la configuración estructural que indican los planos del colegio 780 POST 1997, se desarrolló el modelo matemático tridimensional en el software STERA 3D V10.8. El análisis empleado fue de tipo inelástico, donde las vigas y columnas se representaron mediante elementos tipo barra, los muros se modelaron como tipo área. La *Figura 17* muestra el modelo matemático tridimensional asumido para el análisis inelástico del edificio.

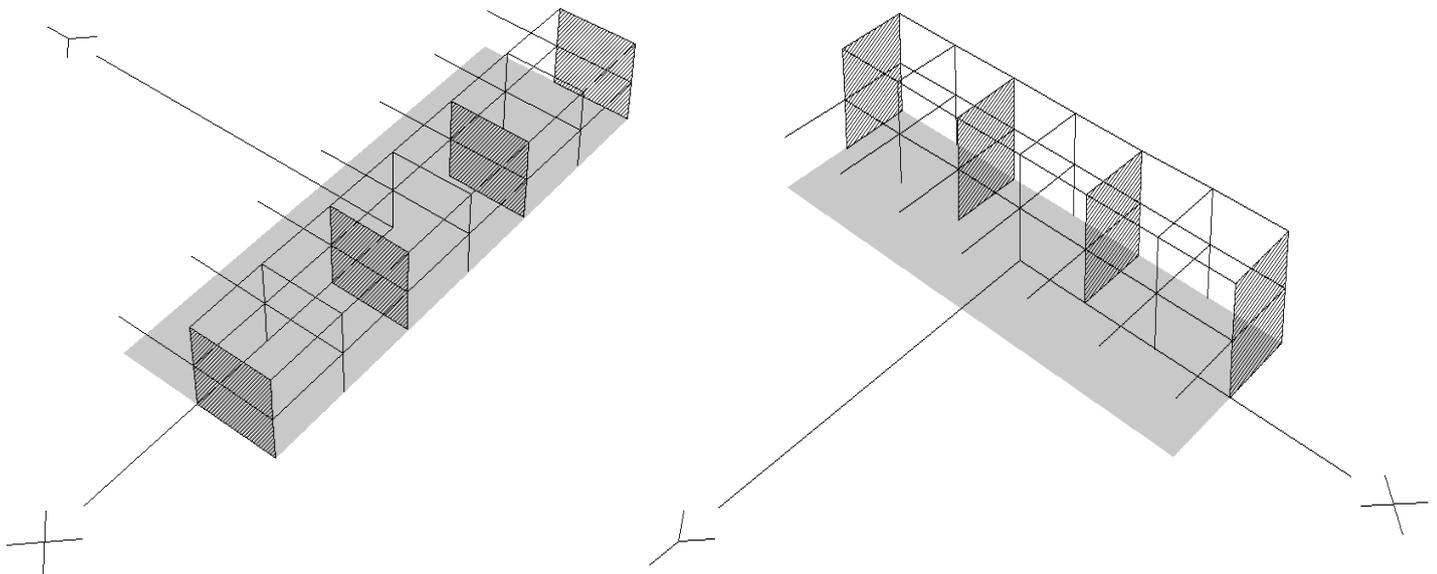


Figura 17. Modelo matemático tridimensional.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

5.4.2 Análisis estático no lineal

El análisis estático no lineal se realizó a través de la aplicación de cargas incrementales en sentido positivo y negativo de la dirección longitudinal y de la dirección transversal, considerando una distribución de carga modal, tal como recomienda el ATC-40.

- ✓ **Masas de la estructura:** Las masas de cada nivel se determinó a partir del metrado de cargas. La **Tabla 5** muestra las propiedades inerciales encontradas:

Tabla 5

Masas inerciales y pesos

Piso	$masa_x = masa_y$ (tonf. s ² /m)	Peso (kN)
2	15.50	1,489
1	28.60	2,747

Nota: Adaptado de “Evaluación del desempeño sismorresistente de los Colegios Peruanos Modernos”, (p.41), por León y Quintana, 2004.

5.4.2.1 Capacidad estructural

La curva de capacidad tanto en la dirección longitudinal como en la dirección transversal se obtuvo mediante procedimientos estáticos no lineales, tal como se muestran a continuación en términos de Cortante de entrepiso (kN) vs Desplazamiento (cm) y Aceleración espectral: $S_a(gal)$ vs Desplazamiento espectral: $S_d(cm)$.

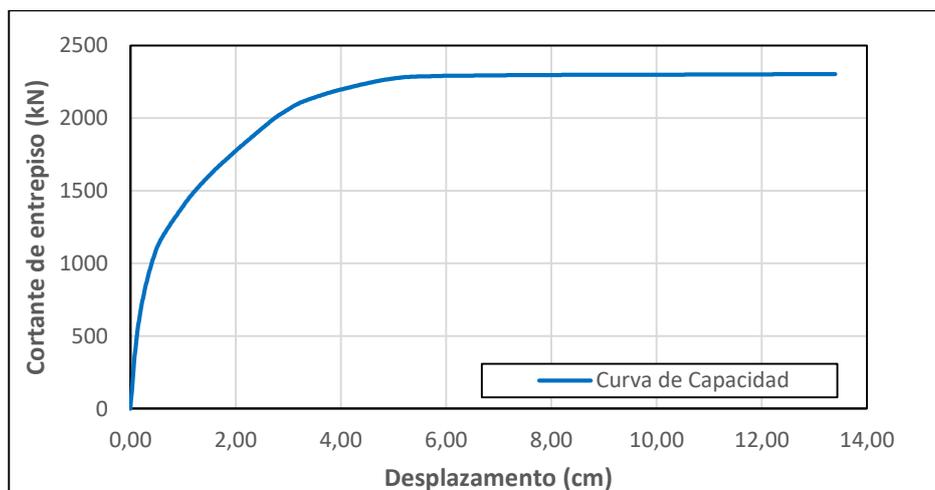


Figura 18. Curva de Capacidad en la dirección longitudinal.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

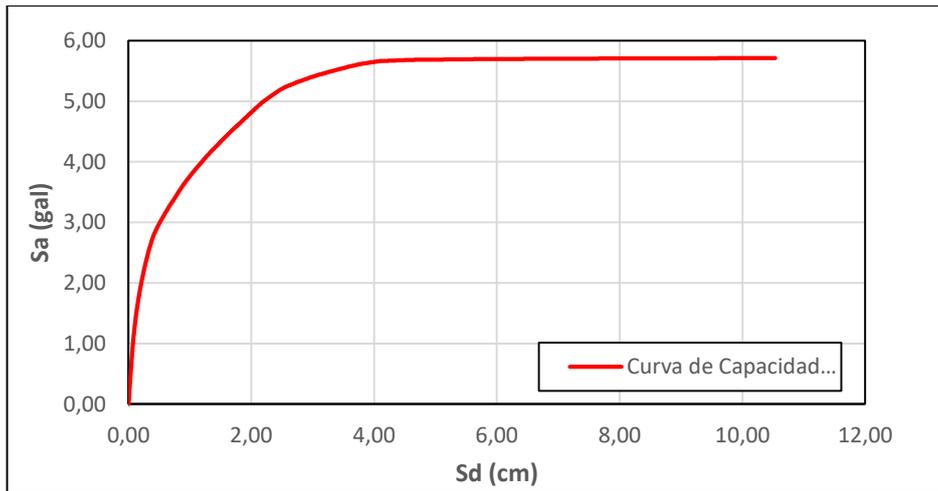


Figura 19. Espectro de Capacidad en la dirección longitudinal.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

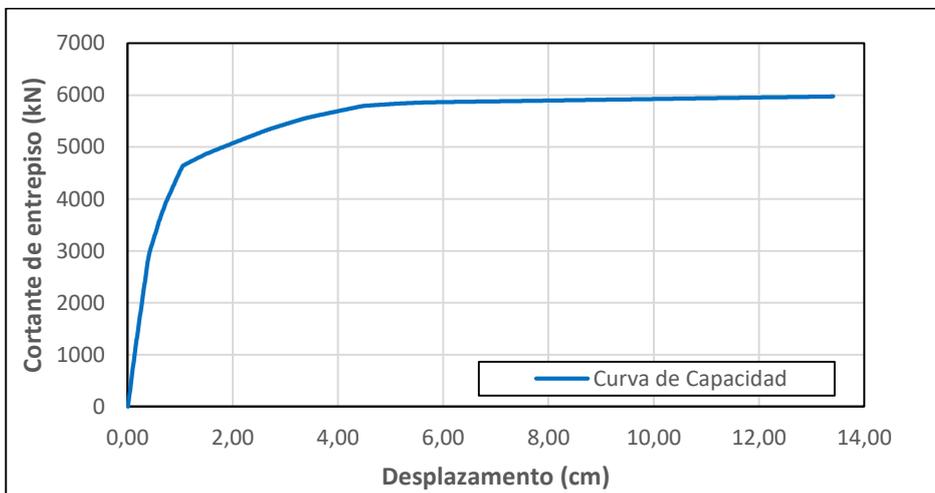


Figura 20. Curva de Capacidad en la dirección transversal.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

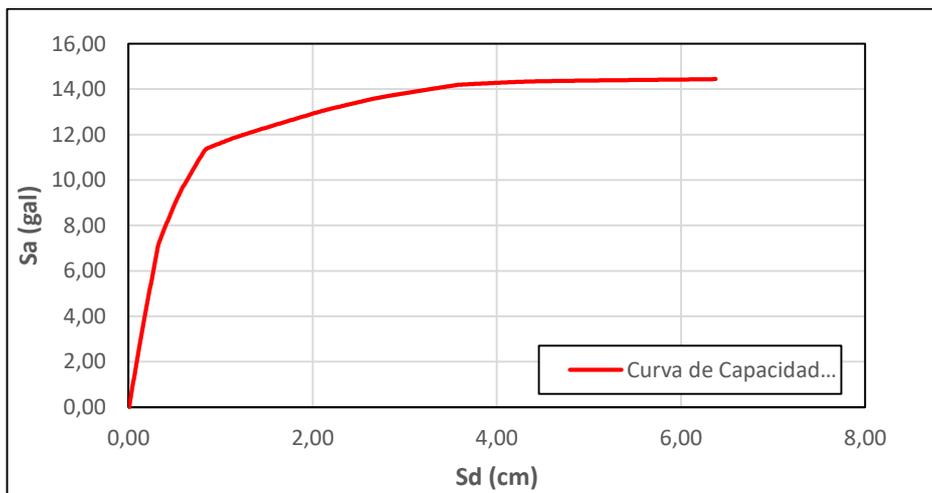


Figura 21. Espectro de Capacidad en la dirección transversal.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

5.4.3 Análisis dinámico no lineal tiempo – historia

Para realizar el análisis de la estructura de cuerdo a los requerimientos de los objetivos de la investigación se seleccionó un juego de siete registros sísmicos amplificados según la norma E030. A su vez, se necesita contar con información complementaria, los cuales serán denominados réplicas y se obtendrán a partir de los registros sísmicos principales. Las réplicas son movimientos sísmicos posteriores a un sismo, de magnitudes menores comparadas con el evento principal. Bajo este concepto, considerando que en el caso más crítico las magnitudes de la réplica no superaran a las magnitudes del evento principal, se duplico el evento principal en un intervalo de 10 segundos para obtener los registros de las réplicas. Tal como se muestra en la *Figura 22*. Sin embargo, es importante precisar que el evento número tres o también denominado replica 02 en la *Figura 22*, es irreal y que simplemente es considerado para analizar la consistencia de los resultados.

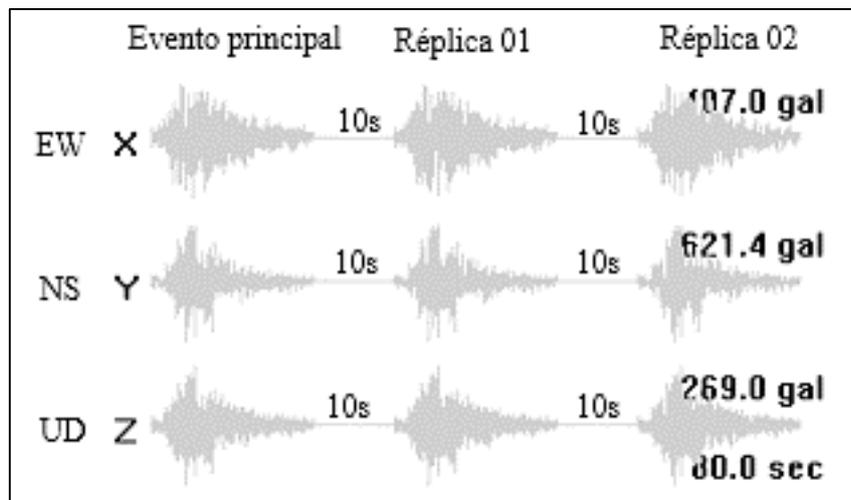


Figura 22. Ejemplo esquemático de los registros sísmicos ingresados al software para realizar el análisis dinámico no lineal tiempo - historia.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

5.4.3.1 Respuestas máximas alcanzadas

La *Tabla 6* y la *Tabla 7* muestran las máximas respuestas alcanzadas del piso 01 y del piso 02 de los siete juegos de registros sísmicos, a partir de los análisis dinámico no lineal tiempo - historia.

Tabla 6*Respuestas máximas alcanzadas de los análisis dinámico no lineal tiempo – historia (piso 01)*

SISMO	Evento sísmico	PISO 01							
		DR _x (cm)	DR _y (cm)	sd _x max abs (cm)	sd _y max abs (cm)	sd _x max ev (cm)	sd _y max ev (cm)	Q _x max(kN)	Q _y max(kN)
Lima 1966	1	0.0089	0.0447	1.2450	0.4767	1.2450	0.4767	1742	3955
	2	0.0160	0.0703	1.4310	0.5182	1.4221	0.4735	1796	3900
	3	0.0131	0.1165	1.5340	0.5581	1.5180	0.4878	1802	4033
Huaraz 1970	1	0.0091	0.0430	2.1460	0.4404	2.1460	0.4404	2299	3821
	2	0.0112	0.0556	2.1980	0.5042	2.1889	0.4612	2117	3717
	3	0.2061	0.0076	2.0970	0.4947	2.0858	0.4391	2057	3473
Lima 1974- Oct	1	0.0308	0.0546	2.6980	0.3499	2.6980	0.3499	2255	3352
	2	0.0228	0.0325	2.7940	0.3551	2.7632	0.3005	2216	3604
	3	0.5498	0.0362	2.7370	0.3743	2.7142	0.3418	2207	3560
Lima 1974- Nov	1	0.0080	0.0090	2.2880	0.3594	2.2880	0.3594	2298	3284
	2	0.0203	0.0260	2.3450	0.4251	2.3370	0.4161	2336	3801
	3	0.1043	0.0192	2.3140	0.4599	2.2937	0.4339	2248	3924
Iquique 2005	1	0.0308	0.0142	1.9150	0.4557	1.9150	0.4557	2121	3840
	2	0.0702	0.0285	1.6860	0.4730	1.6552	0.4588	1947	3932
	3	0.3261	0.1293	1.6450	0.5104	1.5748	0.4819	1888	4094
Pisco 2007	1	0.0479	0.0607	1.9250	0.4161	1.9250	0.4161	2151	3548
	2	0.0925	0.0178	1.9300	0.4390	1.8821	0.3783	2003	3860
	3	0.0372	0.0544	1.9600	0.4777	1.8675	0.4599	1841	3999
Tacna 2010	1	0.0211	0.0022	1.2860	0.3658	1.2860	0.3658	1854	3505
	2	0.0241	0.0003	2.0450	0.3953	2.0239	0.3931	2208	3578
	3	0.0098	0.0058	2.1460	0.4258	2.1219	0.4255	2214	3642
POMEDIO	1	0.0224	0.0326	1.9290	0.4091	1.9290	0.4091	2103	3615
	2	0.0367	0.0330	2.0613	0.4443	2.0389	0.4116	2089	3770
	3	0.1781	0.0527	2.0619	0.4716	2.0251	0.4386	2037	3818

Nota: Elaboración propia, 2021.

Donde:

- ✓ DR_x y DR_y : Desplazamiento Residual.
- ✓ $sd_x \max abs$ y $sd_y \max abs$: Desplazamiento relativo máximo absoluto. Valor absoluto de los desplazamientos relativos picos (negativo y positivo).
- ✓ $sd_x \max ev$ y $sd_y \max ev$: Desplazamiento relativo máximo que se da a partir de cada evento. A este desplazamiento se le disminuye el desplazamiento residual del evento previo.
- ✓ $Q_x \max$ y $Q_y \max$: Cortante de entrepiso máximo absoluto.

Las Figuras 23, 24, 25, 26, 27 y 28, muestran para el piso 01, los desplazamientos residuales, los desplazamientos máximos absolutos y los desplazamientos relativos máximos que se dan a partir de cada evento, respectivamente.

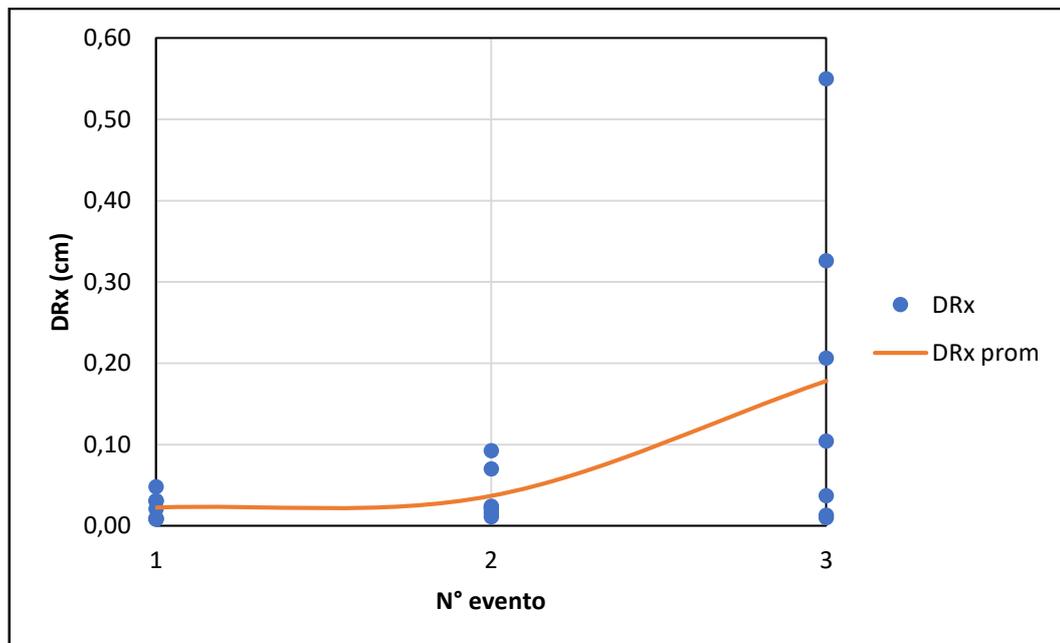


Figura 23. Desplazamiento residual en la dirección longitudinal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

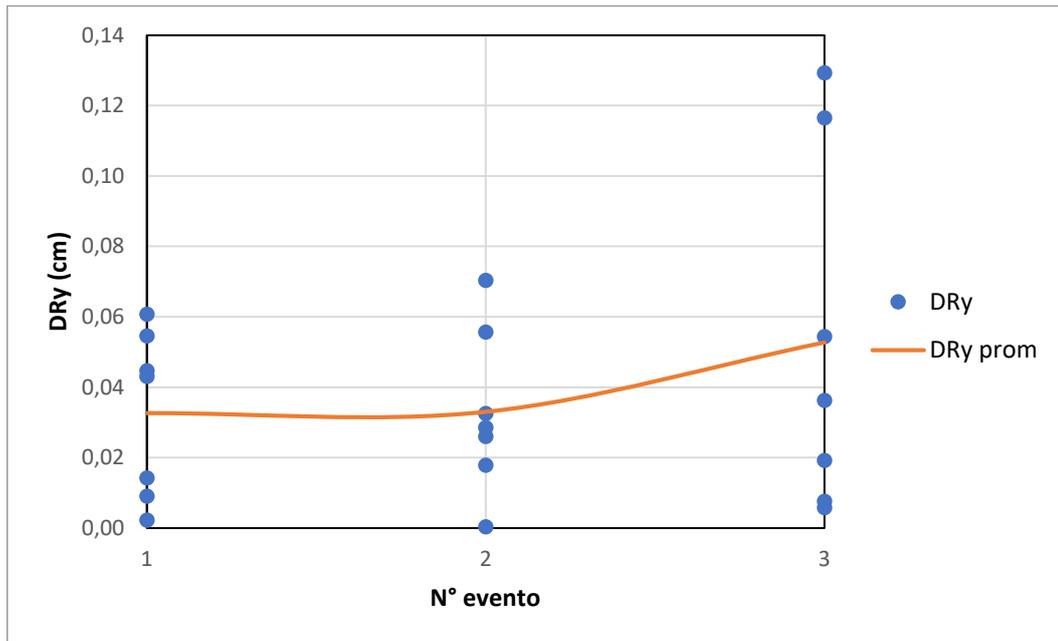


Figura 24. Desplazamiento residual en la dirección transversal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

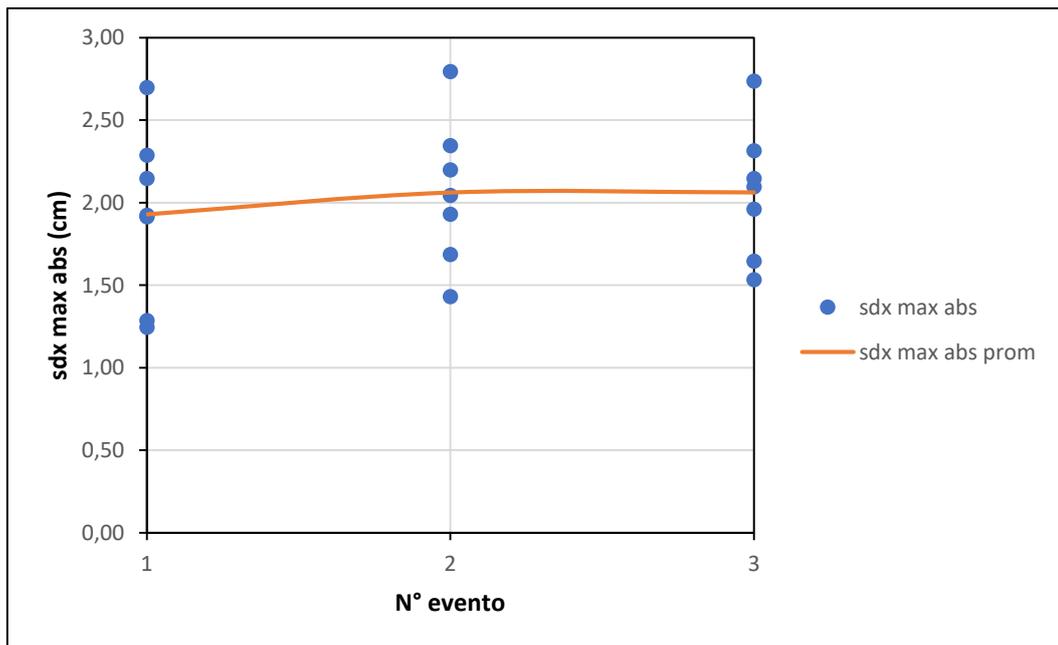


Figura 25. Desplazamiento máximo absoluto en la dirección longitudinal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

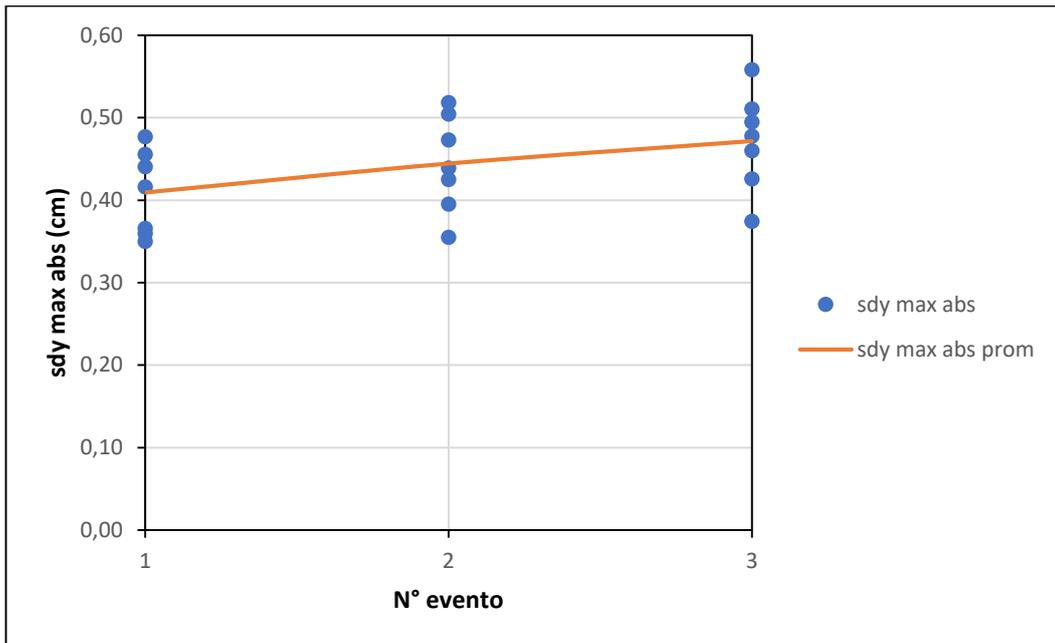


Figura 26. Desplazamiento máximo absoluto en la dirección transversal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

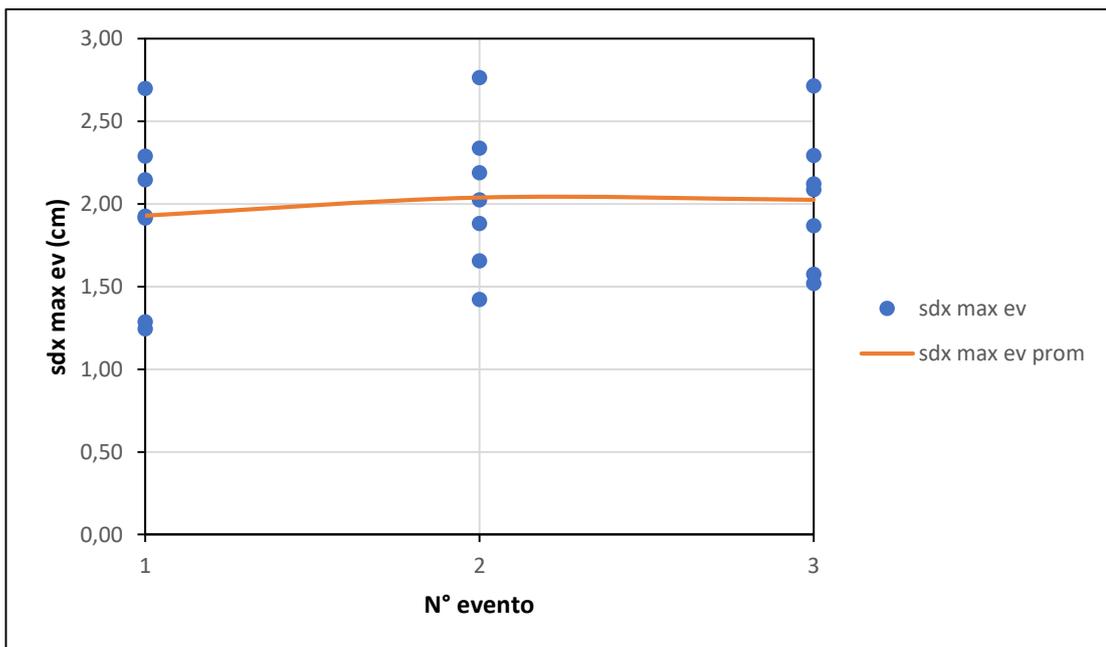


Figura 27. Desplazamiento máximo relativo en la dirección longitudinal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

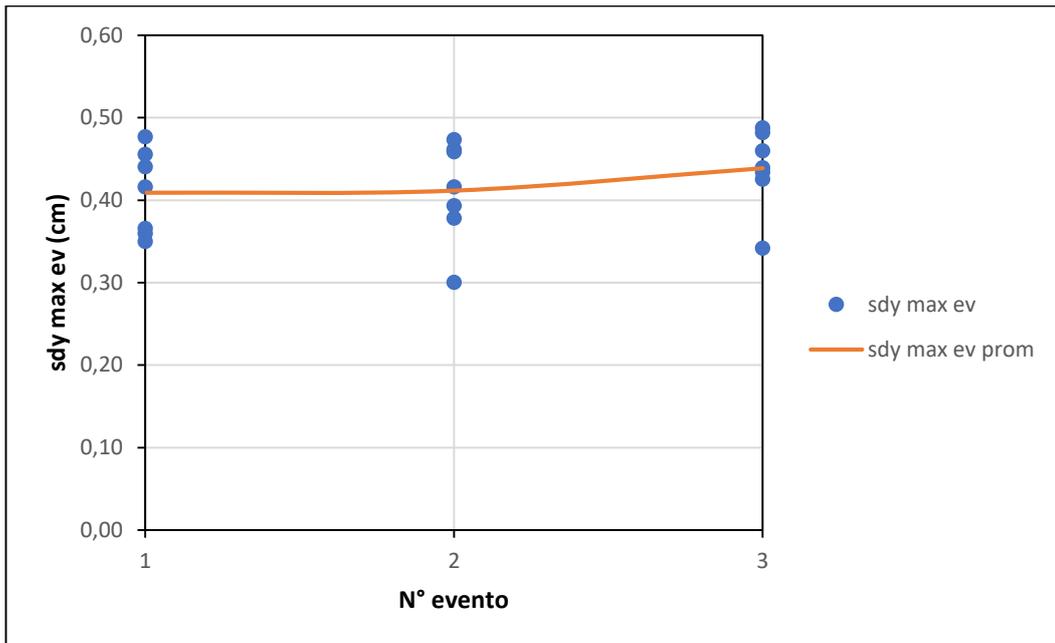


Figura 28. Desplazamiento máximo relativo en la dirección transversal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

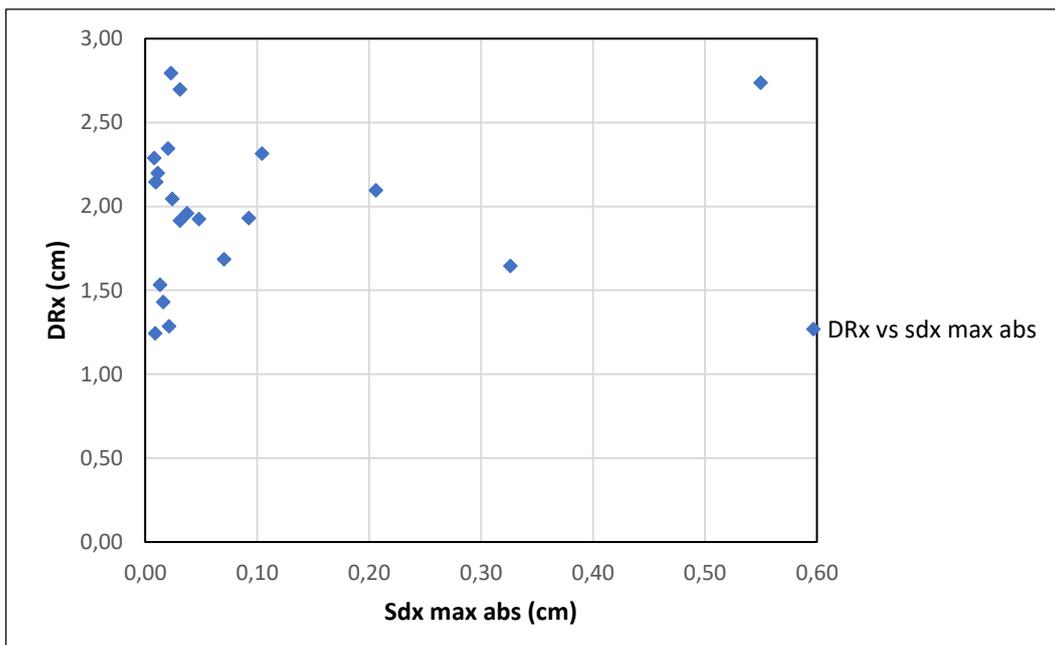


Figura 29. Desplazamiento residual vs Desplazamiento máximo absoluto en la dirección longitudinal.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

La **Figura 29** muestra que no existe una relación clara entre el desplazamiento residual y el desplazamiento máximo absoluto en la dirección longitudinal del piso 01.

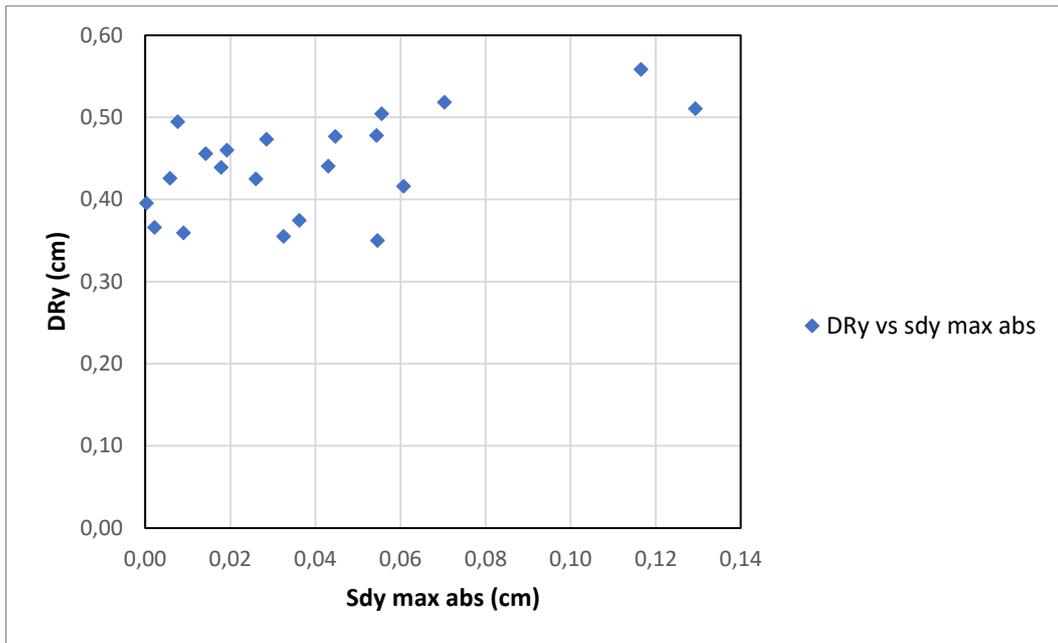


Figura 30. Desplazamiento residual vs Desplazamiento máximo absoluto en la dirección transversal.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

La **Figura 30** muestra que no existe una relación clara entre el desplazamiento residual y el desplazamiento máximo absoluto en la dirección transversal del piso 01.

Tabla 7*Respuestas máximas alcanzadas de los análisis dinámico no lineal tiempo – historia (piso 02)*

SISMO	Evento sísmico	PISO 02							
		DR _x (cm)	DR _y (cm)	sd _x max abs (cm)	sd _y max abs (cm)	sd _x max ev (cm)	sd _y max ev (cm)	Q _x max(kN)	Q _y max(kN)
Lima 1966	1	0.0259	0.0443	0.6114	0.1837	0.6114	0.1837	892	1792
	2	0.0512	0.0941	0.7399	0.2263	0.7140	0.1820	891	1721
	3	0.0477	0.1316	0.8355	0.2721	0.7843	0.1780	923	1659
Huaraz 1970	1	0.0033	0.0340	1.0920	0.1913	1.0920	0.1913	1092	1802
	2	0.0349	0.0391	1.1430	0.2372	1.1397	0.2032	1052	1710
	3	0.1032	0.0205	1.1020	0.2596	1.0671	0.2205	1014	1619
Lima 1974- Oct	1	0.0146	0.0496	1.3790	0.2189	1.3790	0.2189	1111	1604
	2	0.0383	0.0361	1.4550	0.1788	1.4404	0.1292	1110	1592
	3	0.2212	0.1210	1.5570	0.2483	1.5187	0.2122	1060	1509
Lima 1974- Nov	1	0.0159	0.0359	1.0060	0.1753	1.0060	0.1753	1036	1549
	2	0.0373	0.0604	1.1510	0.2029	1.1351	0.1670	1174	1615
	3	0.0267	0.0656	1.1660	0.2315	1.1287	0.1711	1186	1569
Iquique 2005	1	0.0152	0.0214	0.9678	0.1911	0.9678	0.1911	1058	1826
	2	0.0629	0.0524	0.8945	0.2238	0.8793	0.2024	1027	1712
	3	0.2138	0.0953	0.8784	0.2519	0.8155	0.1995	1026	1761
Pisco 2007	1	0.0072	0.0260	1.0870	0.2109	1.0870	0.2109	1157	1613
	2	0.0886	0.0529	1.2280	0.2821	1.2208	0.2561	1033	1651
	3	0.1793	0.0108	1.2760	0.2895	1.1874	0.2366	932	1684
Tacna 2010	1	0.0194	0.0051	0.6465	0.1783	0.6465	0.1783	861	1712
	2	0.0175	0.0055	0.9507	0.1735	0.9313	0.1684	957	1629
	3	0.0114	0.0087	1.0420	0.1850	1.0245	0.1795	1020	1592
POMEDIO	1	0.0145	0.0309	0.9700	0.1928	0.9700	0.1928	1030	1700
	2	0.0472	0.0486	1.0803	0.2178	1.0658	0.1869	1035	1661
	3	0.1148	0.0648	1.1224	0.2483	1.0752	0.1996	1023	1628

Nota: Elaboración propia, 2021.

Donde:

- ✓ DR_x y DR_y : Desplazamiento Residual.
- ✓ $sd_x \max abs$ y $sd_y \max abs$: Desplazamiento relativo máximo absoluto. Valor absoluto de los desplazamientos relativos picos (negativo y positivo).
- ✓ $sd_x \max ev$ y $sd_y \max ev$: Desplazamiento relativo máximo que se da a partir de cada evento. A este desplazamiento se le disminuye el desplazamiento residual del evento previo.
- ✓ $Q_x \max$ y $Q_y \max$: Cortante de entrepiso máximo absoluto.

Las Figuras 31, 32, 33, 34, 35 y 36, muestran para el piso 02, los desplazamientos residuales, los desplazamientos máximos absolutos y los desplazamientos relativos máximos que se dan a partir de cada evento, respectivamente.

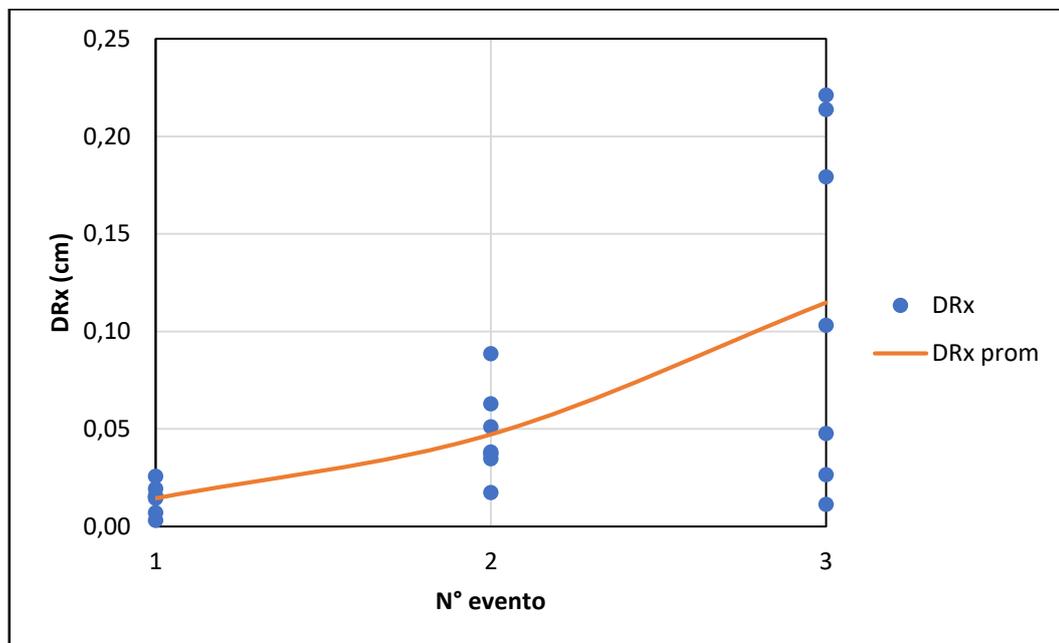


Figura 31. Desplazamiento residual en la dirección longitudinal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

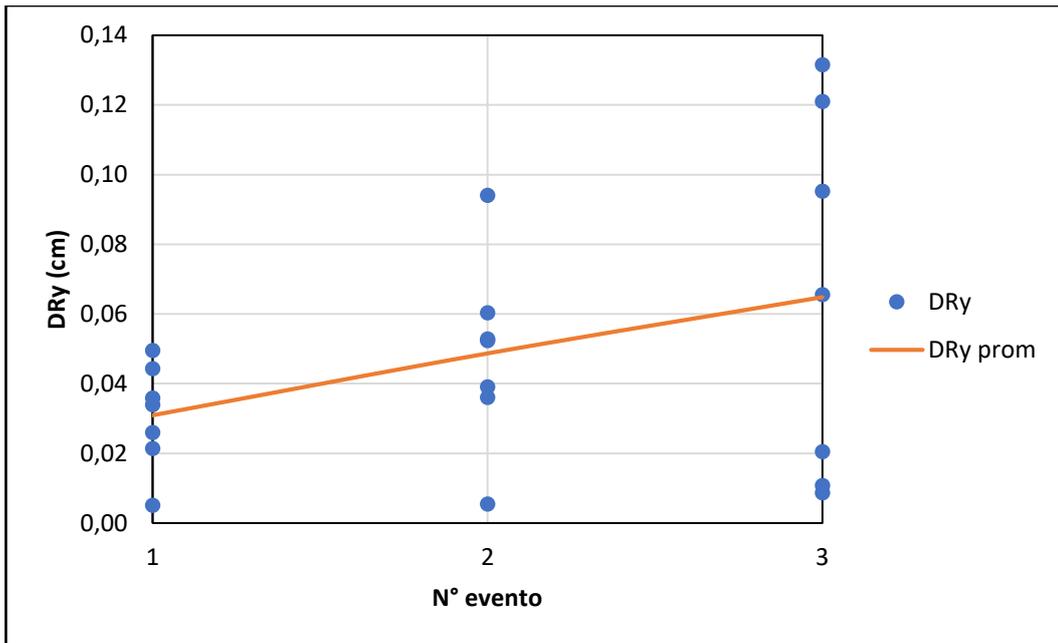


Figura 32. Desplazamiento residual en la dirección transversal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

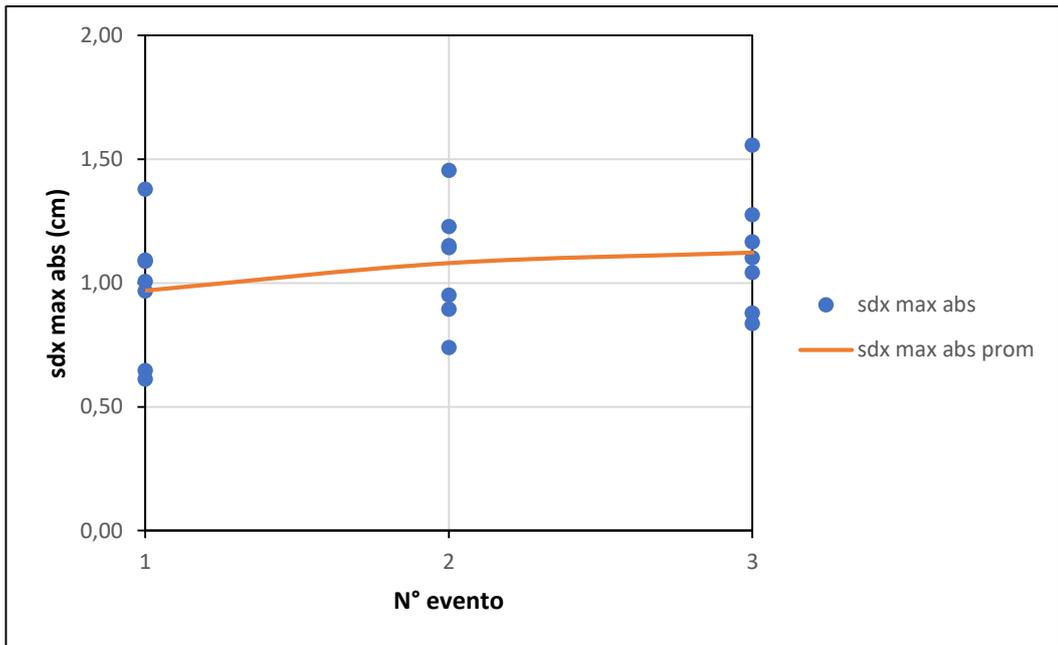


Figura 33. Desplazamiento máximo absoluto en la dirección longitudinal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

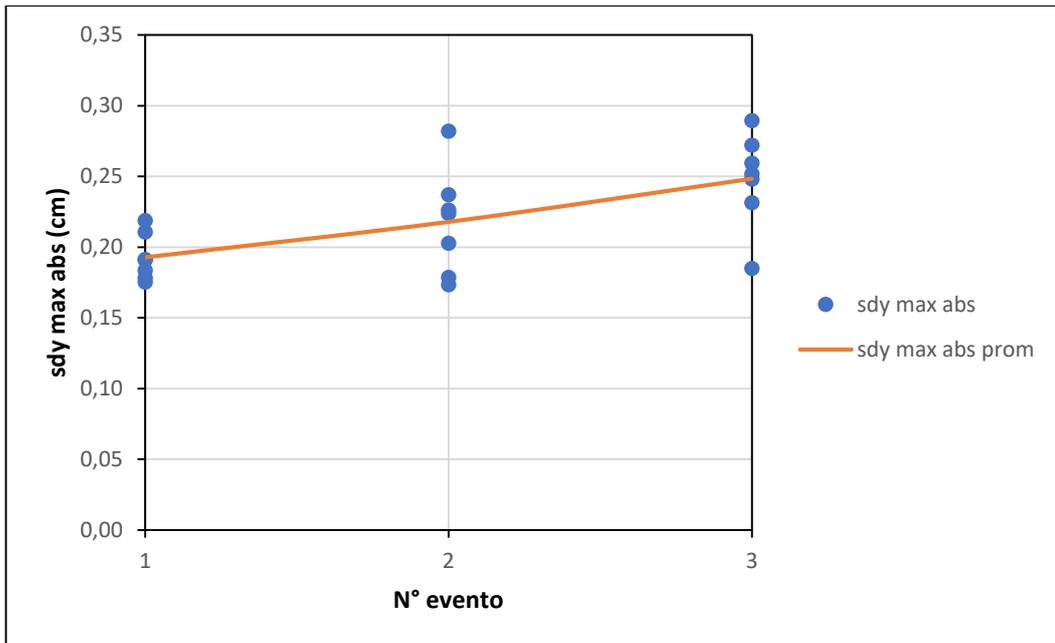


Figura 34. Desplazamiento máximo absoluto en la dirección transversal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

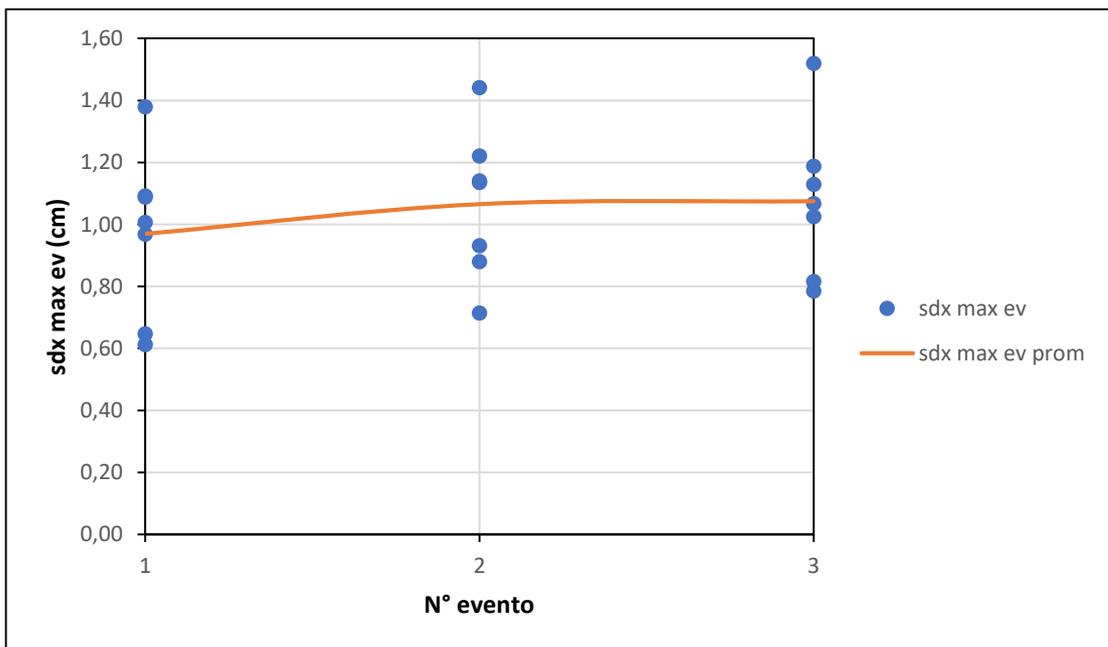


Figura 35. Desplazamiento máximo relativo en la dirección longitudinal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

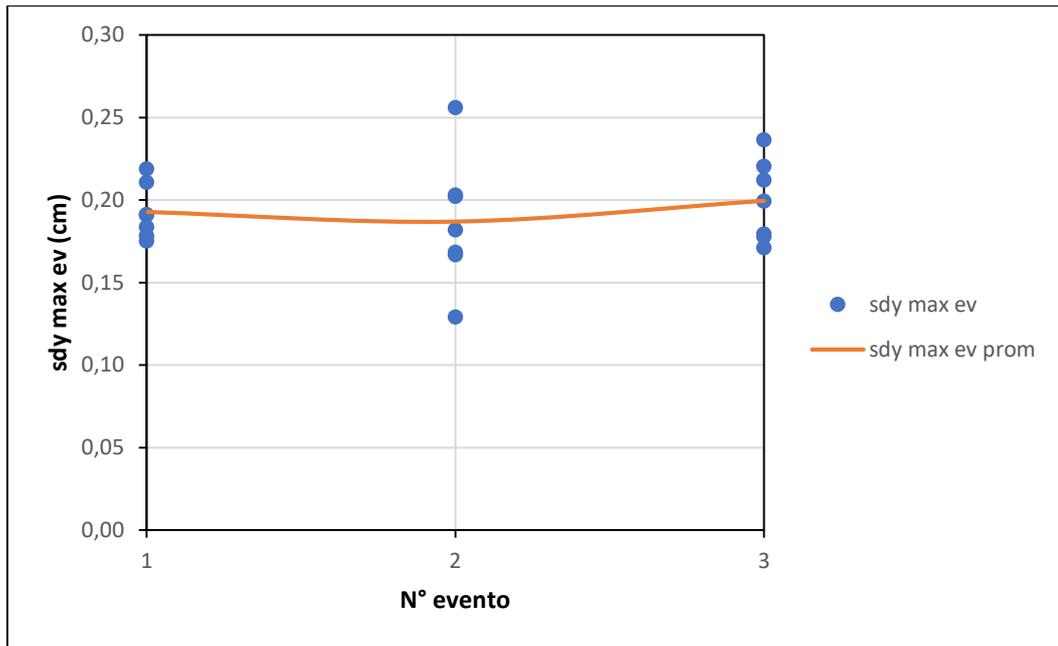


Figura 36. Desplazamiento máximo relativo en la dirección transversal para los tres eventos.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

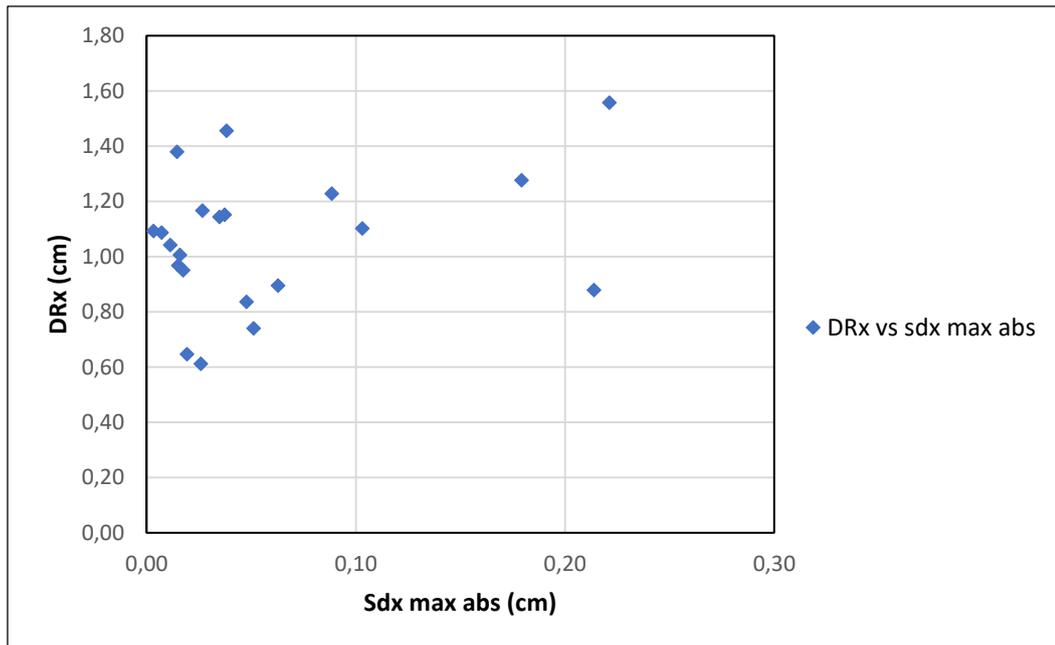


Figura 37. Desplazamiento residual vs Desplazamiento máximo en la dirección longitudinal.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

La Figura 37 muestra que no existe una relación clara entre el desplazamiento residual y el desplazamiento máximo en la dirección longitudinal del piso 02.

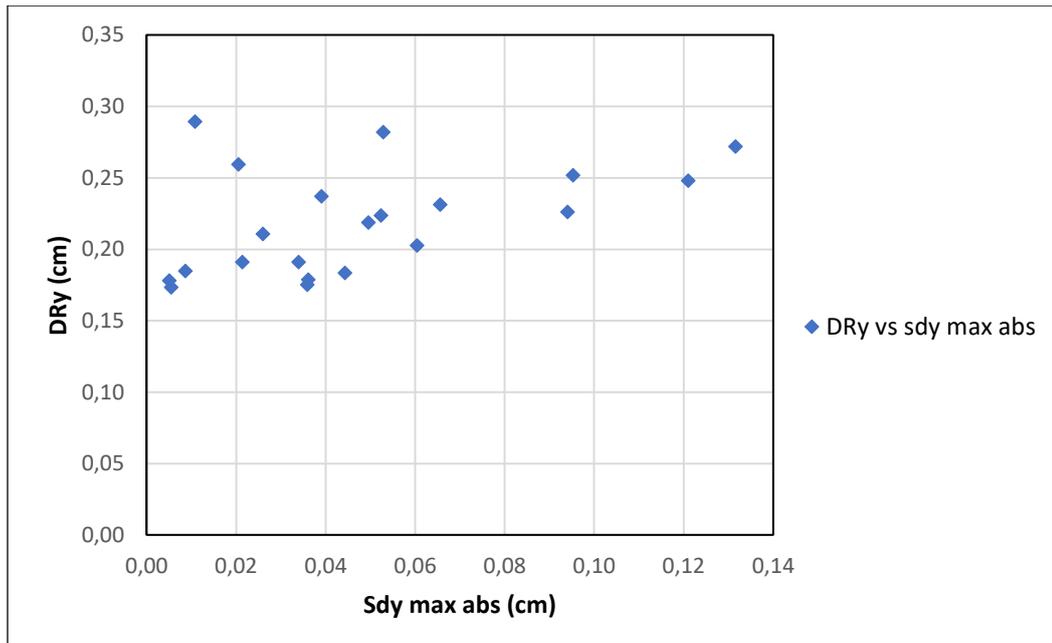


Figura 38. Desplazamiento residual vs Desplazamiento máximo en la dirección transversal.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

La **Figura 38** muestra que no existe una relación clara entre el desplazamiento residual y el desplazamiento máximo en la dirección transversal del piso 02.

5.4.3.1 Respuesta sísmica obtenidas a partir del análisis inelástico

De acuerdo a los requerimientos de la norma E030 2018, se debe verificar el promedio de las respuestas sísmicas para los siete juegos de registros sísmicos, por lo que se procedió a determinar dichos valores. Asimismo, para entender mejor el comportamiento de la estructura frente a diversos escenarios de demandas sísmicas, representaremos los puntos de desempeño en las curvas de comportamiento de los entrepisos, obtenidos mediante procedimientos estáticos no lineales.

La **Tabla 8** y la **Tabla 9** muestran las respuestas máximas alcanzadas y las respuestas máximas amplificadas respectivamente del piso 01, para los siete juegos de registros sísmicos obtenidas a partir de los análisis dinámico no lineal tiempo - historia.

Tabla 8*Respuesta máxima (piso 01)*

N° de evento	Respuesta Máxima			
	dr_x (cm)	V_x (kN)	dr_y (cm)	V_y (kN)
1	1.9290	2103	0.4091	3615
2	2.0389	2089	0.4116	3770
3	2.0251	2037	0.4386	3818

Nota: Elaboración propia, 2021.

Donde:

- ✓ dr_x y dr_y : Desplazamiento relativo máximo.
- ✓ V_x y V_y : Cortante de entrepiso.

Tabla 9*Respuesta máxima amplificada (piso 01)*

N° de evento	Respuesta Máxima Amplificada			
	F. A. para V_x	0.999	F. A. para V_y	1.02
	dr_x (cm)	V_x (kN)	dr_y (cm)	V_y (kN)
1	1.9290	2101	0.4091	3687
2	2.0389	2087	0.4116	3846
3	2.0251	2035	0.4386	3894

Nota: Elaboración propia, 2021.

Donde:

- ✓ dr_x y dr_y : Desplazamiento relativo máximo.
- ✓ V_x y V_y : Cortante de entrepiso amplificado.
- ✓ F. A. para V_x y F. A. para V_y : Factor de Amplificación.

La *Figuras 39* y La *Figura 40*, muestran para el piso 01, las respuestas máximas alcanzadas tanto en la dirección longitudinal y en la dirección transversal, respectivamente.

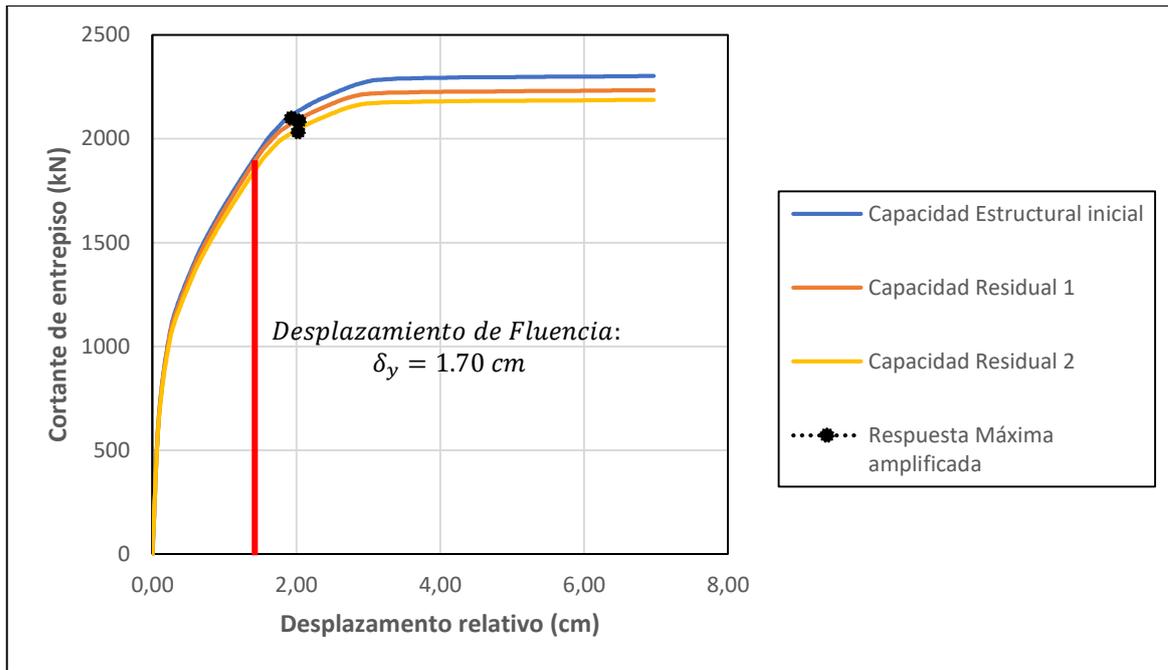


Figura 39. Respuesta máxima amplificada en la dirección longitudinal para los tres eventos (piso 01).

Fuente: Elaboración propia. (2021)

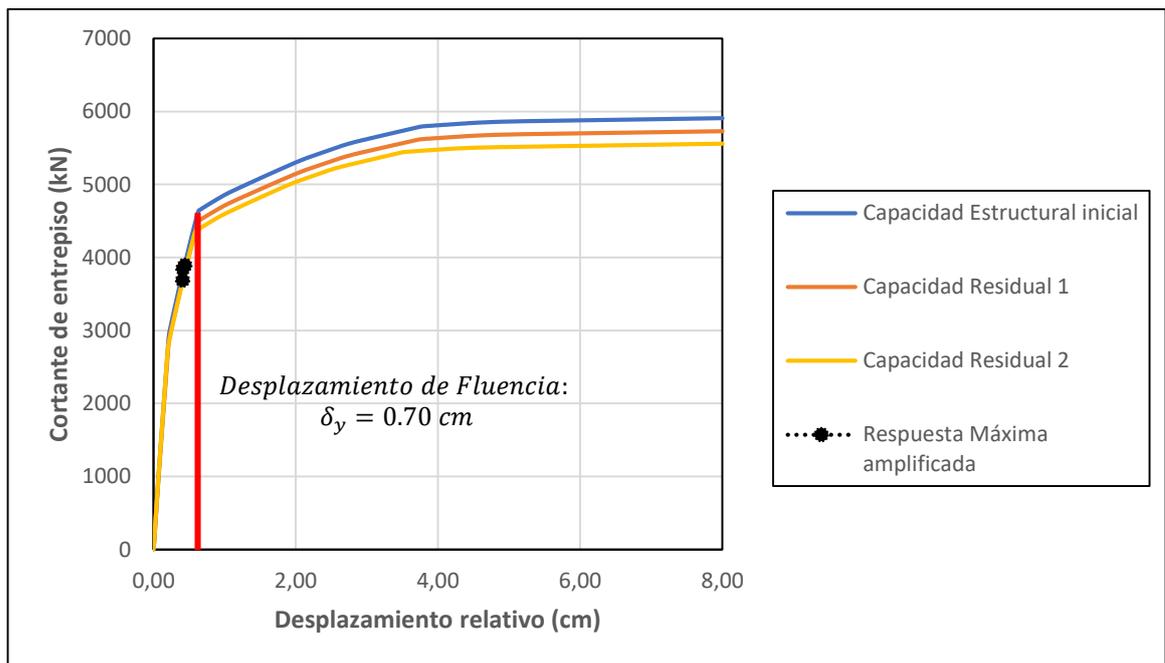


Figura 40. Respuesta máxima amplificada en la dirección transversal para los tres eventos (piso 01).

Fuente: Elaboración propia. (2021)

La Tabla 10 y la Tabla 11 muestran las respuestas máximas alcanzadas y las respuestas máximas amplificadas respectivamente del piso 02, para los siete juegos de registros sísmicos obtenidos a partir de los análisis dinámico no lineal tiempo - historia.

Tabla 10*Respuesta máxima (piso 02)*

N° de evento	Respuesta Máxima			
	dr_x (cm)	V_x (kN)	dr_y (cm)	V_y (kN)
1	0.9700	1030	0.1928	1700
2	1.0658	1035	0.1869	1661
3	1.0752	1023	0.1996	1628

Nota: Elaboración propia, 2021.

Donde:

- ✓ dr_x y dr_y : Desplazamiento relativo máximo.
- ✓ V_x y V_y : Cortante de entrepiso.

Tabla 11*Respuesta máxima amplificada (piso 02)*

N° de evento	Respuesta Máxima Amplificada			
	F. A. para V_x	1.22	F. A. para V_y	1.18
	dr_x (cm)	V_x (kN)	dr_y (cm)	V_y (kN)
1	0.9700	1256	0.1928	2006
2	1.0658	1263	-	-
3	1.0752	1248	-	-

Nota: Elaboración propia, 2021.

Donde:

- ✓ dr_x y dr_y : Desplazamiento relativo máximo.
- ✓ V_x y V_y : Cortante de entrepiso amplificado.
- ✓ F. A. para V_x y F. A. para V_y : Factor de Amplificación.

La *Figuras 41* y La *Figura 42*, muestran para el piso 02, las respuestas máximas tanto en la dirección longitudinal y en la dirección transversal, respectivamente.

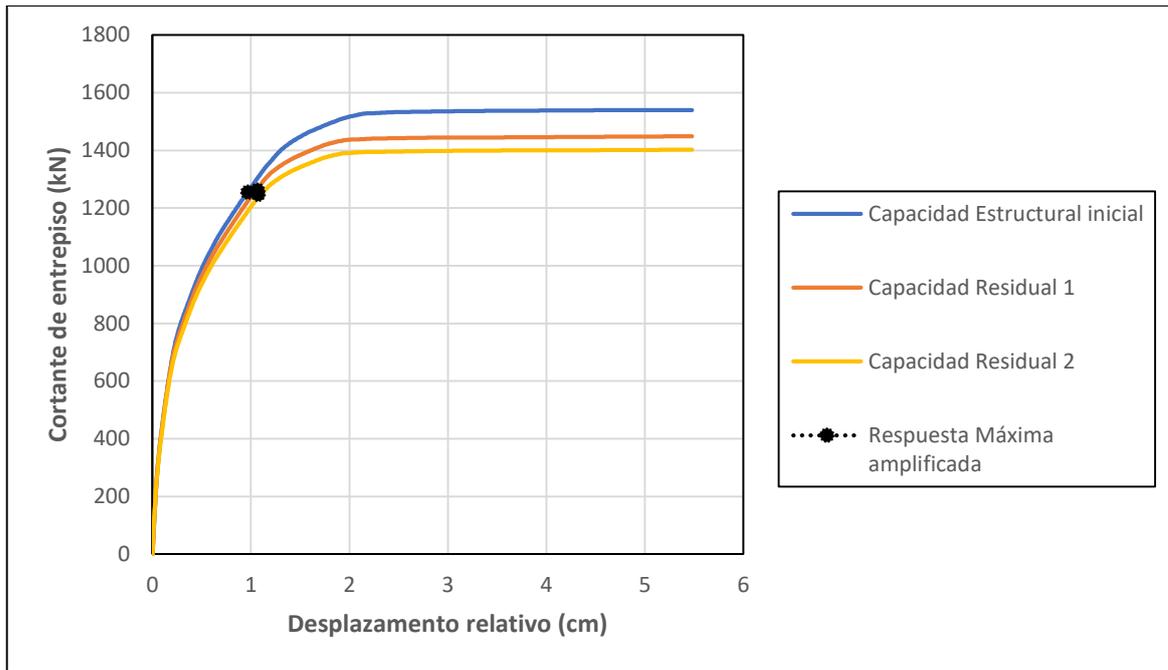


Figura 41. Respuesta máxima amplificada en la dirección longitudinal para los tres eventos (piso 02).

Fuente: Elaboración propia. (2021)

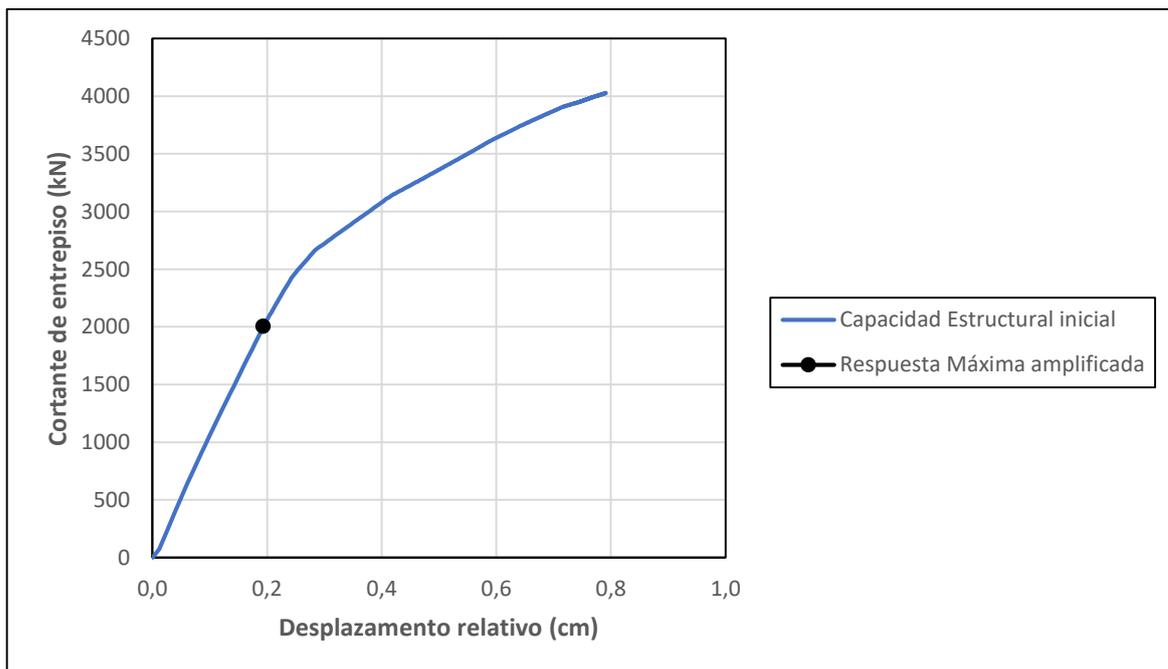


Figura 42. Respuesta máxima amplificada en la dirección transversal para los tres eventos (piso 02).

Fuente: Elaboración propia. (2021)

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

6.1.1 Conclusión General

Los resultados obtenidos del estudio analítico indican que el colegio 780 POST 1997 conserva la capacidad de disipar energía luego de haber soportado las sollicitaciones del primer evento sísmico, es decir, tiene la capacidad de resistir una eventual posible replica. Asimismo, se observa que la estructura presenta mayores daños en el primer nivel más que el segundo nivel y en la dirección longitudinal más que en la dirección transversal.

El desplazamiento máximo no necesariamente indica un mayor nivel de daño, sino el desplazamiento residual. Sin embargo, se ha observado que, para esta estructura, la respuesta máxima no produce un daño importante, ya que la estructura no supera el nivel de fluencia global, simplemente se queda en el nivel de agrietamiento, solo en la dirección longitudinal incursiona al rango inelástico alguno elementos estructurales como las vigas. Del mismo modo, se determinó que no existe una relación clara entre el desplazamiento máximo y el desplazamiento residual, por lo que se concluye que cuando la estructura no incursiona en el rango inelástico, es decir, no supera el punto de fluencia global, no existe una marcada relación del desplazamiento máximo y el nivel de daño.

Finalmente, podemos validar la hipótesis principal de esta investigación, indicando que según las respuestas máximas alcanzadas luego de realizar el análisis dinámico no lineal tiempo – historia, la estructura en general del colegio 780 POST 1997 no logra superar el rango elástico, por lo que se determina que se encuentra en un estado de daño despreciable. Del mismo modo, se verifica que la edificación escolar puede soportar una posible réplica, por lo tanto, podemos garantizar su uso después de haber soportado las sollicitaciones de un evento sísmico severo, de tal manera que se estaría brindando seguridad de vida a sus habitantes y se evitaría pérdidas humanas ante posibles replicas.

6.1.2 Conclusiones Específicas

De acuerdo con los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- a) Luego de analizar la estructura del colegio 780 POST 1997 con un juego de siete registros sísmicos, los cuales simulan los diversos escenarios de demandas sísmicas, se determinó que la estructura de la edificación escolar alcanza un nivel de daño despreciable, por lo tanto, para la demanda sísmica adaptada se esperaría un nivel de desempeño totalmente operacional.
- b) Los elementos estructurales del colegio 780 POST 1997 no incursionan en el rango inelástico de su comportamiento, es decir, no superan el punto de fluencia global, de manera que se quedan en el nivel de agrietamiento.
- c) De acuerdo a los estudios realizados por Pulido et al. (2015), la demanda sísmica más probable para los próximos años según el análisis de todos los escenarios planteados en Lima, el promedio de PGA y PGV alcanzan 700 cm/s^2 y 70 cm/s , respectivamente, pero estos valores pueden ser tan grandes como 1000 cm/s^2 y 100 cm/s para movimientos de suelo, lo que significa que la desviación estándar está por encima de la media. Estas amplitudes de movimiento del suelo son comparables a las intensidades inferidas para Lima durante el gran terremoto de 1746 (MMI ~ IX).
- d) En el análisis dinámico no lineal tiempo historia las respuestas máximas promedio pertenecen al piso uno. Siendo en la dirección longitudinal: para el evento N°01: 1.9290 cm, para el evento N° 02: 2.0389 cm y para el evento N° 03: 2.0251 cm, y en la dirección transversal: para el evento N° 01: 0.4091 cm, para el evento N° 02: 0.4116 cm y para el evento N° 03: 0.4386 cm, por lo que podemos afirmar que la dirección longitudinal es más flexible que la dirección transversal.

- e) La estructura cumple con los parámetros de desempeño establecidos para una edificación esencial, porque tiene la capacidad de seguir disipando las solicitaciones de una posible réplica.

6.2 Recomendaciones

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se recomienda lo siguiente:

Realizar un estudio más profundo con equipos sofisticados para determinar las propiedades de los materiales existentes in situ, ya que para desarrollar el presente estudio se tuvo en cuenta solamente la información plasmada en los planos. Asimismo, se recomienda realizar una evaluación de la cimentación de la edificación escolar, en vista de que el presente estudio abarca solo análisis de la estructura que esta sobre la cimentación.

Por otro lado, también es necesario precisar que se debe llevar a cabo una inspección técnica de la estructura en estudio, considerando que cuando se realiza un análisis en un programa computacional especializado en el objeto de estudio, generalmente se idealiza la estructura en un modelo matemático que nos permita realizar los cálculos de manera más sencilla, a consecuencia de ello, dicha idealización en muchas ocasiones se escapa de la realidad.

Finalmente, otro aspecto importante que se debe tener en cuenta es que cuando se realiza el diseño de este tipo de estructura se debe ver la forma aumentar la rigidez en la dirección longitudinal, puesto que la demanda sísmica afecta mayormente esa dirección.

Referencias

- ATC-40. (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. California.
- Aguilar, R., y Ruiz, S., (2002). *Influencia de los modelos de plasticidad en las respuestas sísmicas mediante el Método del Espectro de Capacidad*. Ponencia presentada en el XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Tema 1, N°-34, Puebla, México.
- Aragón, J., (2013). *Evaluación sistematizada multinivel de la seguridad estructural de las edificaciones* (Tesis de grado). México.
- Barlek, P., (2015). Capacidad sísmica residual de columnas de hormigón armado (Tesis de grado). Extraído de <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/wp-content/uploads/sites/22/2016/05/PabloBarlek-Capacidad-Sísmica-Residual-de-Columnas-de-HºAº-V-Final.pdf>
- Barlek, P., y Galíndez, E., (2016). Capacidad sísmica residual de columnas de hormigón armado mediante análisis dinámicos no lineales. *XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Asunción-Paraguay, Noviembre*.
- Bernal, I., y Tavera H., (2002). *Geodinámica, sismicidad y energía sísmica*. Perú: Lima.
- Botas, G., y Espinosa, (2012). *Diseño por desempeño*. México.
- CAPECO (2018). *La construcción informal en el Perú*. Extraído el 04 de junio, 2021 de <https://acarquitectos.com.pe/wonderful-serenity-has-taken/>
- Carreño, M., Cardona, O., y Barbat, A. (2005). *Evaluación “ex-post” del estado de daño en los edificios afectados por un terremoto*. España: Madrid.
- Carreño, M., Cardona, O., y Barbat, A. (2011). Evaluación de la habitabilidad de edificios afectados por sismos utilizando la teoría de conjuntos difusos y las redes neuronales artificiales. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, 27(4), 278-293.

- Castillo, J., y Alva, J., (1993). *Peligro sísmico en el Perú*. Ponencia presentada en el VII Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Extraído el 2 de diciembre, 2020 de http://www.jorgealvahurtado.com/files/redacis15_a.pdf
- Cazau, P., (2006). *Introducción a la investigación en ciencias sociales*. 3° edición. Buenos Aires.
- Chancón, R., y Paz, I., (2016). *Análisis de desempeño sísmico de los edificios escolares típicos 780 post 97 de la costa peruana* (Tesis de grado). Extraído de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6891>
- Delgado, C., y Mantilla, R., (2012). *Estudio de vulnerabilidad y rehabilitación estructural para el edificio de secundaria y administración del colegio fundación UIS* (Tesis de grado). Extraído de <http://noesis.uis.edu.co/handle/123456789/36689>
- SENCICO, (2020). Análisis sísmico del edificio administrativo del SENCICO (Pabellón A) para la elaboración de la propuesta de sensorización para la evaluación del comportamiento estructural. Diciembre.
- Diaz, M., et al., (2019). Development of analytical models for confined masonry walls based on experimental results in Lima city. Extraído de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2309-04132019000200001&lng=es&nrm=iso
- Diaz, M., et al., (2018). Experimental study of three retrofitting techniques for typical school buildings in Perú. *16TH EUROPEAN CONFERENCE ON EARTHQUAKE ENGINEERING, Junio*.
- EERI, (octubre 2008). The Wenchuan, Sichuan Province, China, Earthquake of May 12, 2008. Extraído de https://www.eeri.org/site/images/eeri_newsletter/2008_pdf/Wenchuan_China_Recon_Rpt.pdf

- Guevara, N., Osorio, S., y Arturo, E., (2006). *Evaluación de la capacidad estructural del edificio de la biblioteca de las ingenierías y arquitectura, utilizando análisis estático no lineal (Pushover)* (Tesis de grado). San Salvador.
- Hernandez, Fernandez y Baptista, (01 de diciembre de 2012). Tesis de investigación [Mensaje en un blog]. Recuperado de <http://tesisdeinvestig.blogspot.com/2012/12/disenos-no-experimentales-segun.html>
- Huapaya, R., (2017). *Evaluación de los indicadores de comportamiento sísmico de edificios con sistema aporticado a través del método estático no lineal* (Tesis de grado). Extraído de <http://repositorio.urp.edu.pe/bitstream/handle/URP/1305/TESIS%20-%20HUAPAYA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- IGP, (2012). *Conceptos básicos*. Extraído el 08 de abril, 2021 de <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/76090-conceptos-basicos>
- Krawinkler, H., y Seneviratna, G.D.P.K., (1998). Pros and Cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation. *Engineering Structures*, 20(4-6), Estados Unidos, 452-464.
- León, H., Quintana, U., (2004). *Evaluación del desempeño Sismorresistente de los Colegios Peruanos Modernos* (Tesis de grado). Facultad de Ciencias e Ingeniería, PUCP. Lima.
- López, C., Pérez, C., y Solórzano, L., (2017). *Aplicación de la metodología de evaluación estructural por desempeño sísmico para la evaluación del ala norte del edificio de la facultad de medicina de la universidad de el salvador* (Tesis de grado). Extraído de <http://ri.ues.edu.sv/13122/1/Aplicación%20de%20la%20metodología%20de%20evaluación%20estructural%20por%20desempeño%20sísmico%20para%20la%20evaluación%20del%20ala%20norte%20del%20edificio%20de%20la%20Facultad%20de%20Medicina%20de%20la%20Universidad%20de%20El%20Salvador.pdf>

- López, O., Marinilli, A., Bonilla, R., Fernández, N., Domínguez, J., Coronel, G., Baloa, T., y Vielma, R. (2010). Evaluación sismorresistente de edificios escolares en Venezuela. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 25(4), 81-94.
- Maeda, M., Alwashall, H., & Matsukawa, K., (24-26 de junio de 2019). *An overview of post earthquake damage and residual capacity evaluation for reinforced concrete buildings in japan*. 7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.), Creta, Grecia. <https://www.researchgate.net/publication/337419890>
- Saito, T., (s.f.). ESTERA3D, Technical Manual V6.4. Japan.
- Marder, K., (2018). *Post-Earthquake Residual Capacity of Reinforced Concrete Plastic Hinges* (Tesis Doctoral). New Zealand.
- Moquete, F., (2012). *Evaluación del Riesgo Sísmico en Edificios Especiales: Escuelas. Aplicación a Barcelona* (Tesis de postgrado). Catalunya.
- Muñoz, A., Tinman, M., Quiun, D., (s.f.). *Riesgo sísmico de edificios peruanos*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Organización Panamericana de la Salud, (2000). Fundamentos para la mitigación de desastres en el establecimiento de la salud Programa de Preparativos para Situaciones de Emergencia y Coordinación del Socorro en Casos de Desastres, Washington, D.C., Estados Unidos.
- Polese, M., Ludovico, M., Prota, A., & Manfredi, G., (2012). *Residual capacity of earthquake damaged buildings*. Department of Structural Engineering, University of Naples “Federico II”, Lisboa. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1005.pdf
- Pulido, N., Aguilar, Z., Tavera, H., Chlieh, M., Calderón, D., Sekiguchi, T., Nakai, S., y Yamazaki, F., (2015). *Scenario Source Models and Strong Ground Motion for*

Future Megaeearthquakes: Application to Lima, Central Peru. Bulletin of the Seismological Society of America, (105), 368–386.

Quiroz, E., (2017). *Vulnerabilidad sísmica de una edificación escolar típica módulo 780 Pre NDSR-1997 mediante modelos no lineales* (Tesis de grado). Extraído de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/8610>

Ronal, P., Paul, A., y Chris, D., (1999). *Earthquake Aftershocks – Entering Damage Buildings.* Applied Technology Council.

Safina, S., (2002). *Vulnerabilidad sísmica de edificaciones esenciales, análisis de su contribución al riesgo sísmico* (Tesis Doctoral). Tesis extraída de <https://www.tdx.cat/handle/10803/6226#page=1>

Tavera, H., (1993). *La tierra, tectónica y sismicidad.* Perú: Lima.

Ufuk, Y., (diciembre 2010). *The use of post-earthquake residual displacements as a performance indicator in seismic assessment.* ETH Zürich, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Suiza. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-006485631>

Wilkinson, S., y Hiley, R., (2006). *A non-linear response history model for the seismic analysis of high-rise framed buildings.* EscienceDirect, (8).

Anexos

Anexo I – Matriz de Consistencia y Operacionalización de las Variables

Tabla 12

Matriz de consistencia

Planteamiento del problema	Objetivos de la investigación	Hipótesis de la investigación	Variable de estudio	Dimensiones	Metodología de investigación
<p>1. Problema General</p> <p>¿De qué manera influye la capacidad sísmica residual del colegio 780-POST 1997 en la determinación de su uso después de un evento sísmico severo?</p> <p>2. Problema Especifico</p> <p>a. ¿De qué manera influyen los diversos escenarios de demandas sísmicas en la determinación del nivel de daño del colegio 780-POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima?</p> <p>b. ¿Cuál es el comportamiento de los elementos estructurales del colegio 780-POST 1997 después de un evento sísmico severo, en la Ciudad de Lima?</p> <p>c. ¿Cuál es la demanda sísmica de la réplica más probable que puede surgir en la Ciudad de Lima después de un evento sísmico severo?</p>	<p>1. Objetivo General</p> <p>Establecer la capacidad sísmica residual del colegio 780-POST 1997 para determinar su uso después de un evento sísmico severo empleando un análisis dinámico no lineal tiempo – historia, en la Ciudad de Lima.</p> <p>2. Objetivo Especifico</p> <p>a. Analizar la estructura del colegio 780-POST 1997 frente a diversos escenarios de demandas sísmicas utilizando el método de análisis dinámico no lineal tiempo – historia para determinar su nivel de daño, en la Ciudad de Lima.</p> <p>b. Analizar los elementos estructurales del colegio 780-POST 1997 después de un evento sísmico severo para determinar su comportamiento empleando el método de análisis dinámico no lineal tiempo – historia, en la ciudad de Lima.</p> <p>c. Realizar un estudio de sismicidad para determinar la demanda sísmica de la réplica más probable considerando estudios más recientes de peligro sísmico en la Ciudad de Lima.</p>	<p>1. Hipótesis General</p> <p>La capacidad sísmica residual del colegio 780-POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima indica que la edificación escolar puede seguir siendo usado después de un evento sísmico severo.</p> <p>2. Hipótesis Especifico</p> <p>a. El análisis estructural del colegio 780-POST 1997 ubicado en la ciudad de Lima indica que se encuentra en un nivel de daño alto frente a demandas sísmicas severas.</p> <p>b. Los elementos estructurales del colegio 780-POST 1997 ubicado en la Ciudad de Lima muestran un comportamiento eficiente durante un evento sísmico severo.</p> <p>c. El estudio de sismicidad indica que existe una alta probabilidad de que ocurra una réplica con una demanda sísmica moderada en la Ciudad de Lima tras un gran terremoto.</p>	<p>Variables</p> <p>Variable I. 1: Capacidad sísmica residual</p> <p>Variable I. 2: Uso del colegio 780-POST 1997</p>	<p>Dimensiones</p> <p>- Análisis estático no lineal (push-over)</p> <p>- Análisis dinámico no lineal tiempo – historia</p> <p>-Estado de daño</p> <p>-Nivel de desempeño</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>El tipo de investigación para el presente trabajo es explicativo.</p> <p>Método de investigación</p> <p>Esta investigación es de aspecto Cuantitativo.</p> <p>Diseño de investigación</p> <p>En la presente investigación se plantean dos tipos de análisis: el análisis estático no lineal y el análisis dinámico no lineal tiempo historia empleando el software STERA3D V10.8.</p> <p>Técnica e Instrumentación</p> <p>La técnica que se utilizó para esta investigación fue por observación directa de los eventos y toma de datos, usando como herramienta de procesamiento y análisis de datos un programa computacional especializado en el análisis estático no lineal y análisis dinámico no lineal tiempo - historia.</p> <p>Población y muestra</p> <p>La población de estudio está formada por colegios típicos del Perú ubicados en la Ciudad de Lima, denominados 780-POST 1997 que son empleados para oficinas, bibliotecas y laboratorios. De los cuales, empleando el muestreo por conveniencia se seleccionó un colegio típico del Perú de dos niveles.</p>

Nota: Elaboración propia, 2021.

Tabla 13*Operacionalización de las variables*

Variables	Dimensiones	Indicadores	Tipo
Capacidad sísmica residual	Análisis estático no lineal (push-over)	- Curva de capacidad	Independiente
	Análisis dinámico no lineal tiempo – historia	- Registros sísmicos más representativos. - Desempeño de la estructura.	
Uso de colegio 780–POST 1997	Estado de daño	- Despreciable - Ligero - Moderado - Severo - Completo	Dependiente
	Nivel de desempeño	- Totalmente operacional - Operacional - Seguridad - Pre-colapso - Colapso	

Nota: Elaboración propia, 2021.

Anexo II – Respuestas sísmicas

Respuestas sísmicas obtenidas a partir del análisis dinámico no lineal tiempo - historia

✓ Sismo Lima 1966

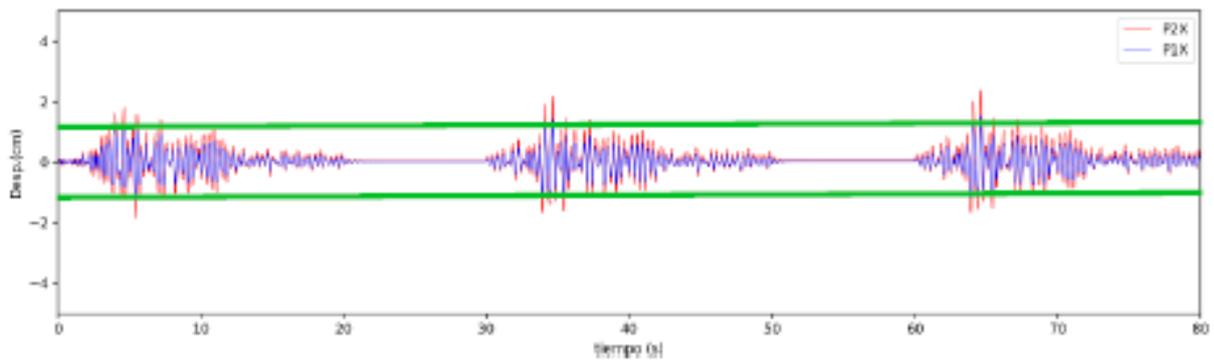


Figura 43. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Lima 1966.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

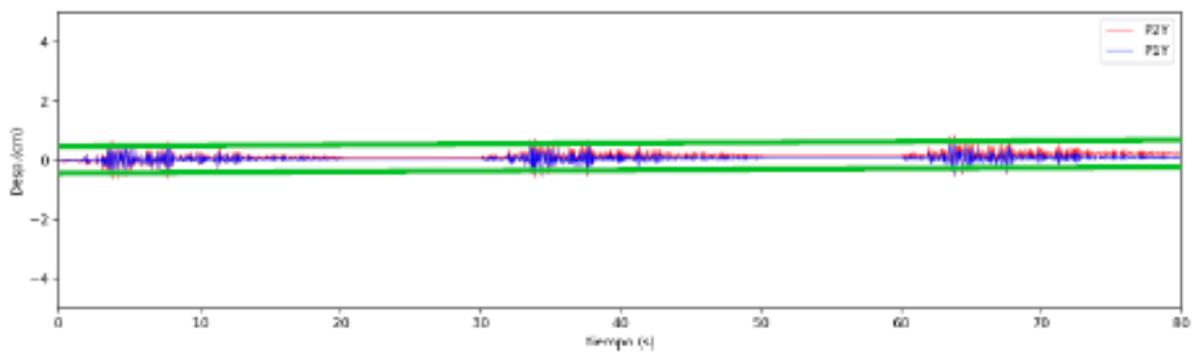


Figura 44. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Lima 1966.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ Sismo Huaraz 1970

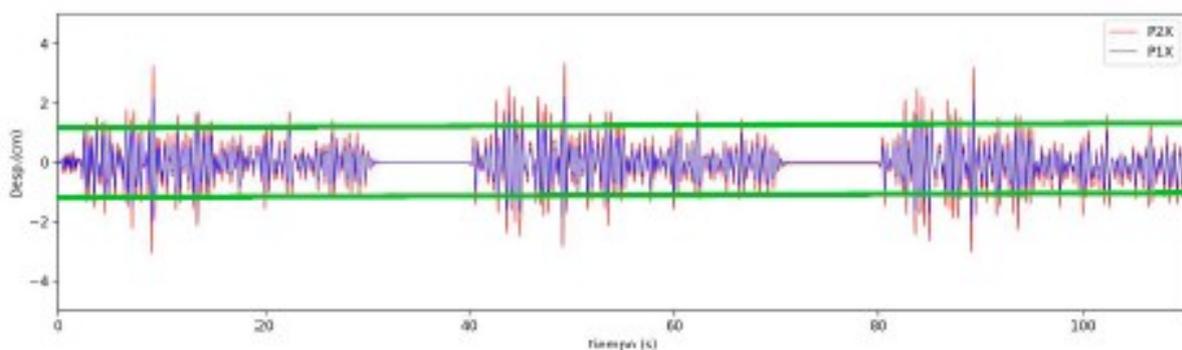


Figura 45. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Huaraz 1970.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

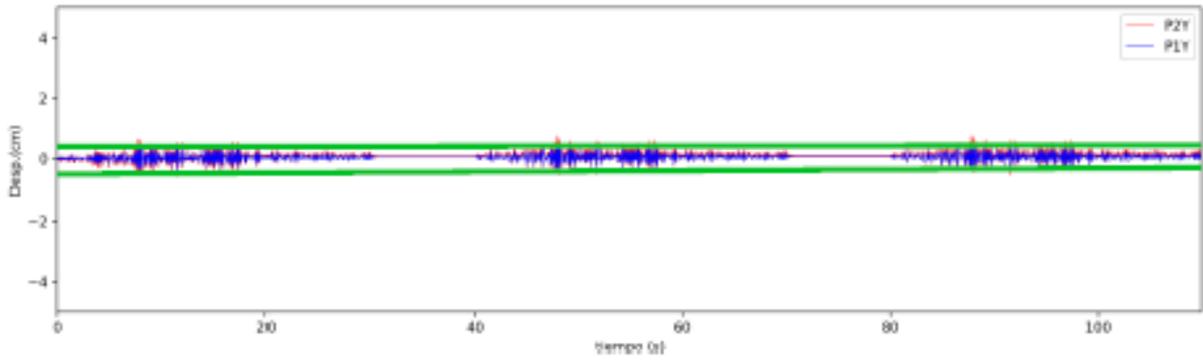


Figura 46. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Huaraz 1970.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ **Sismo Lima 1974 octubre**

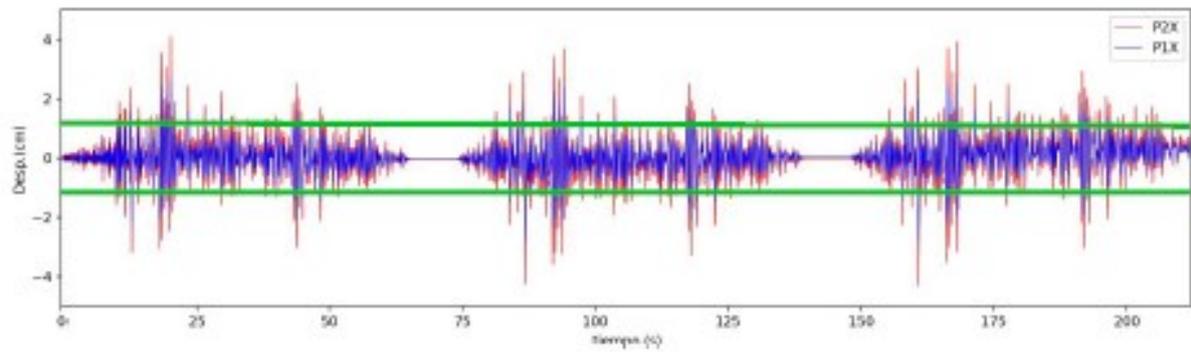


Figura 47. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Lima 1974 octubre.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

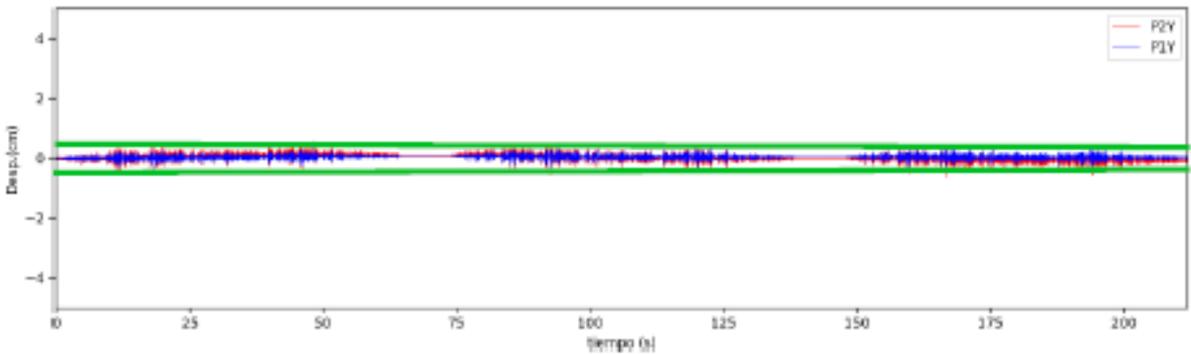


Figura 48. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Lima 1974 octubre.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ **Sismo Lima 1974 noviembre**

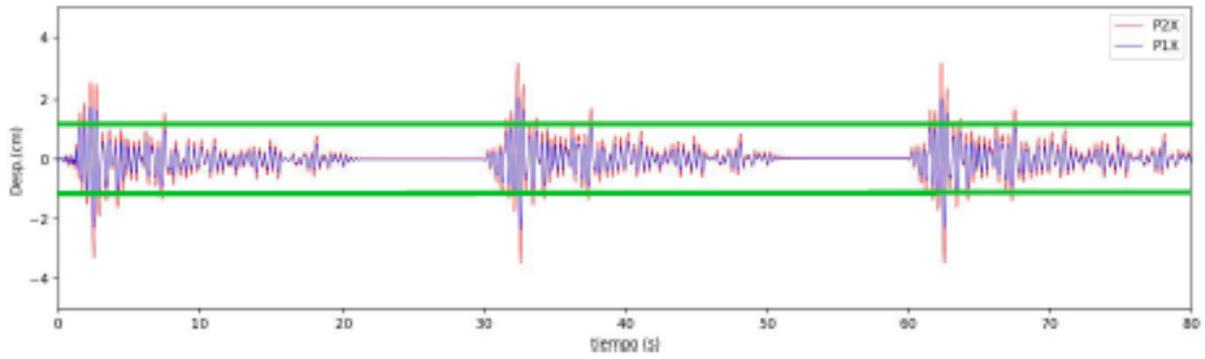


Figura 49. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Lima 1974 noviembre.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

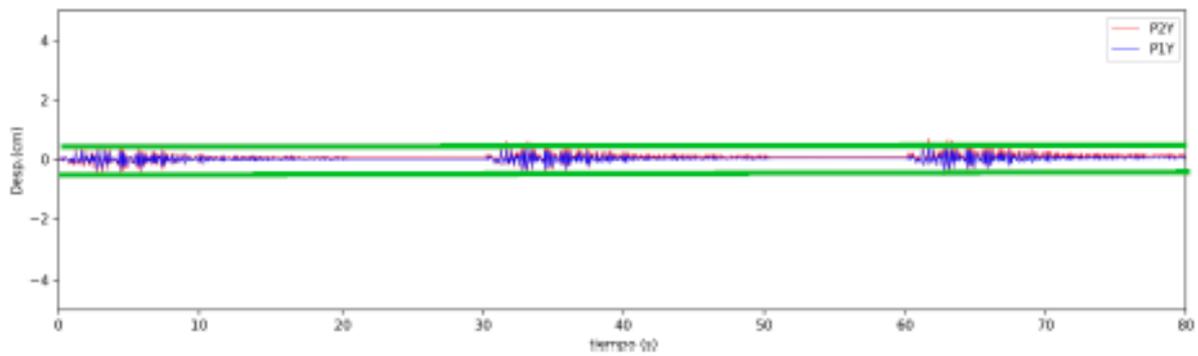


Figura 50. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Lima 1974 noviembre.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ **Sismo Iquique 2005**

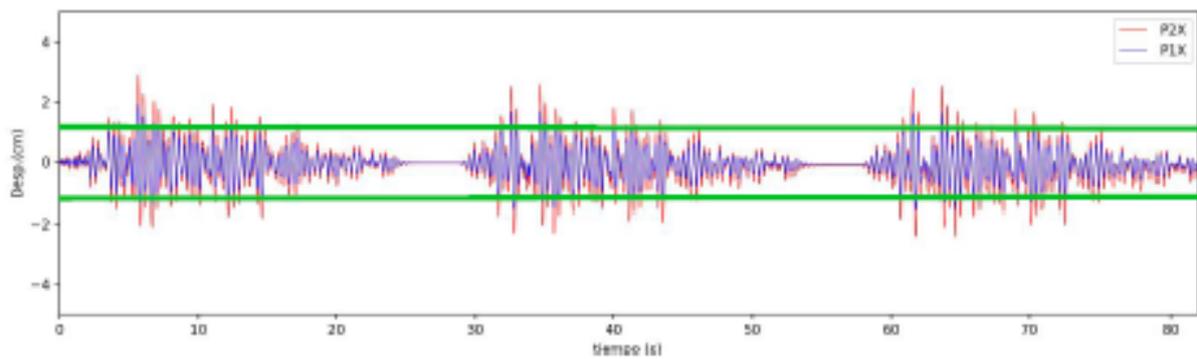


Figura 51. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Iquique 2005.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

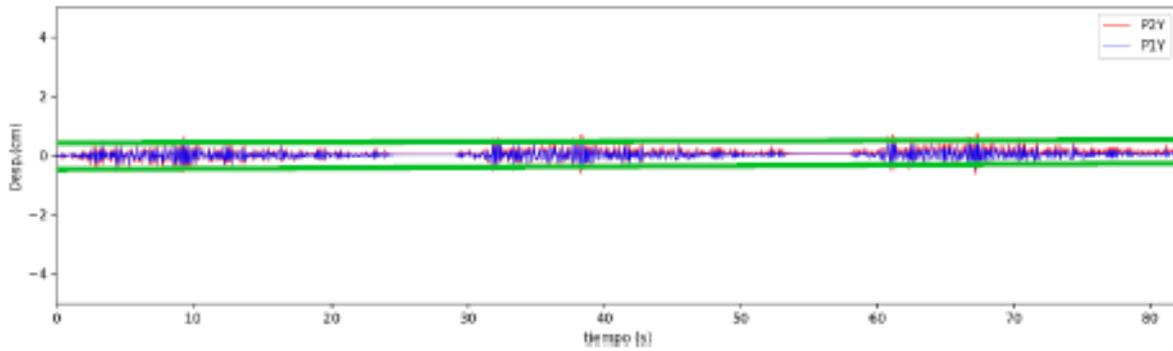


Figura 52. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Iquique 2005.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ **Sismo Pisco 2007**

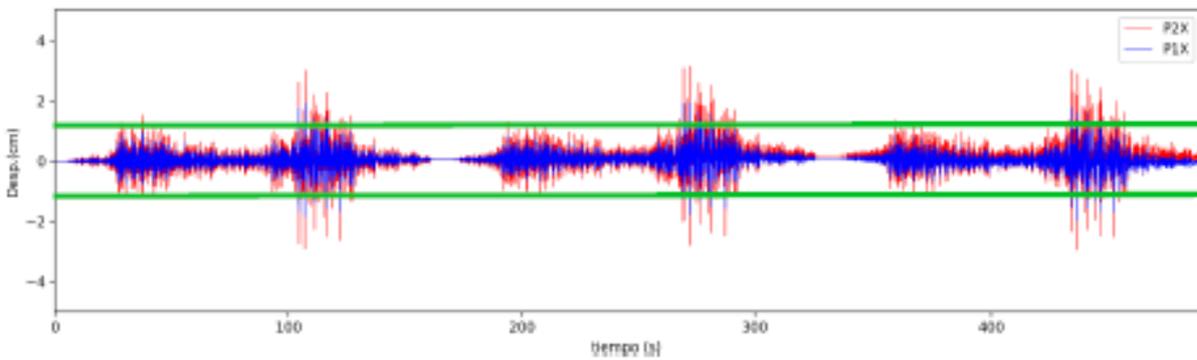


Figura 53. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Pisco 2007.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

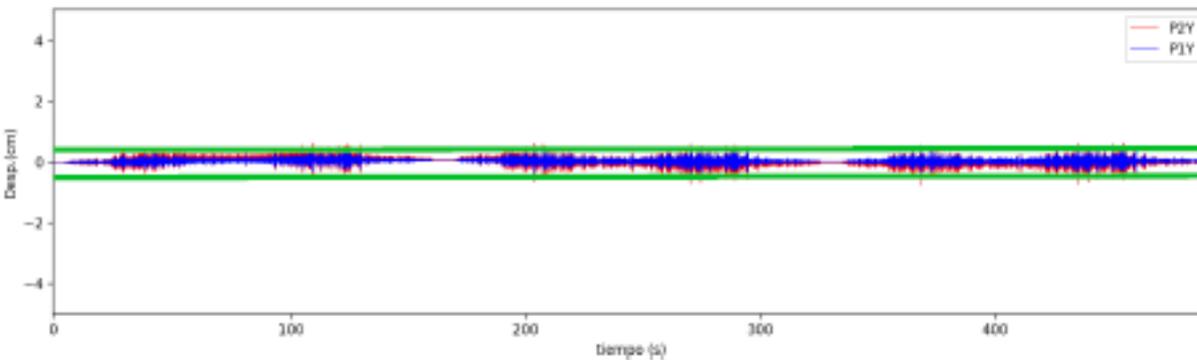


Figura 54. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Pisco 2007.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ **Sismo Tacna 2010**

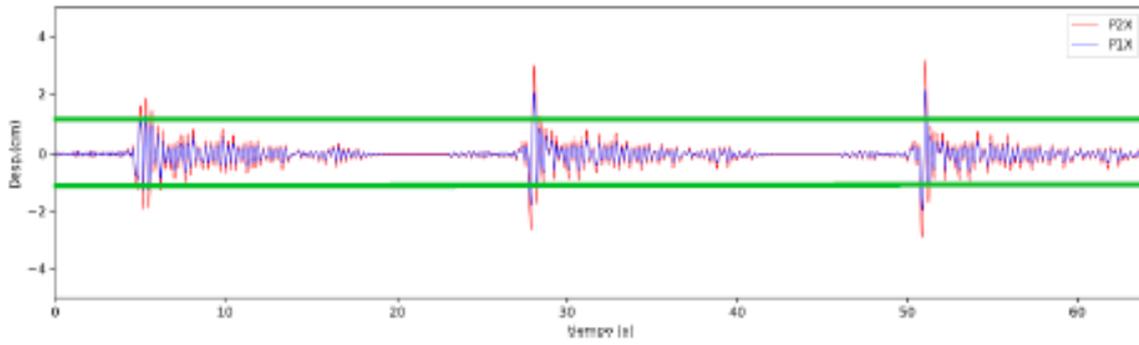


Figura 55. Desplazamiento en la dirección longitudinal bajo el sismo amplificado de Tacna 2010.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

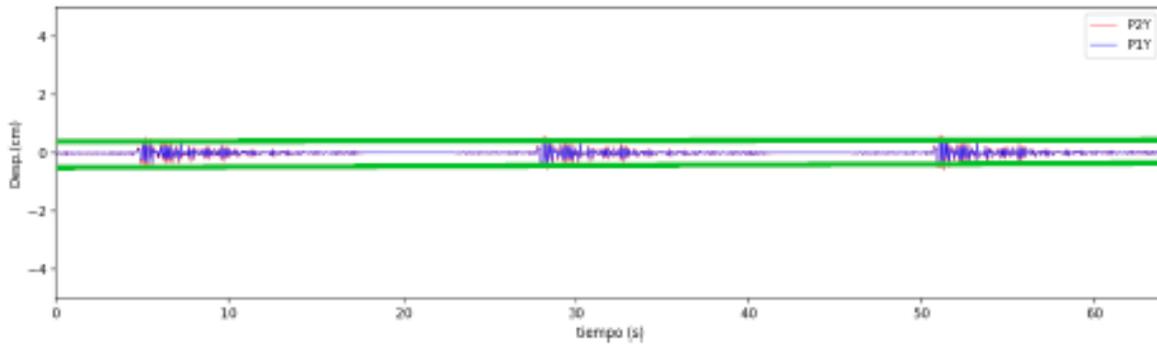


Figura 56. Desplazamiento en la dirección transversal bajo el sismo amplificado de Tacna 2010.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

Gráficas de curvas histeréticas obtenidas a partir del análisis dinámico no lineal tiempo – historia

✓ Sismo Lima 1966

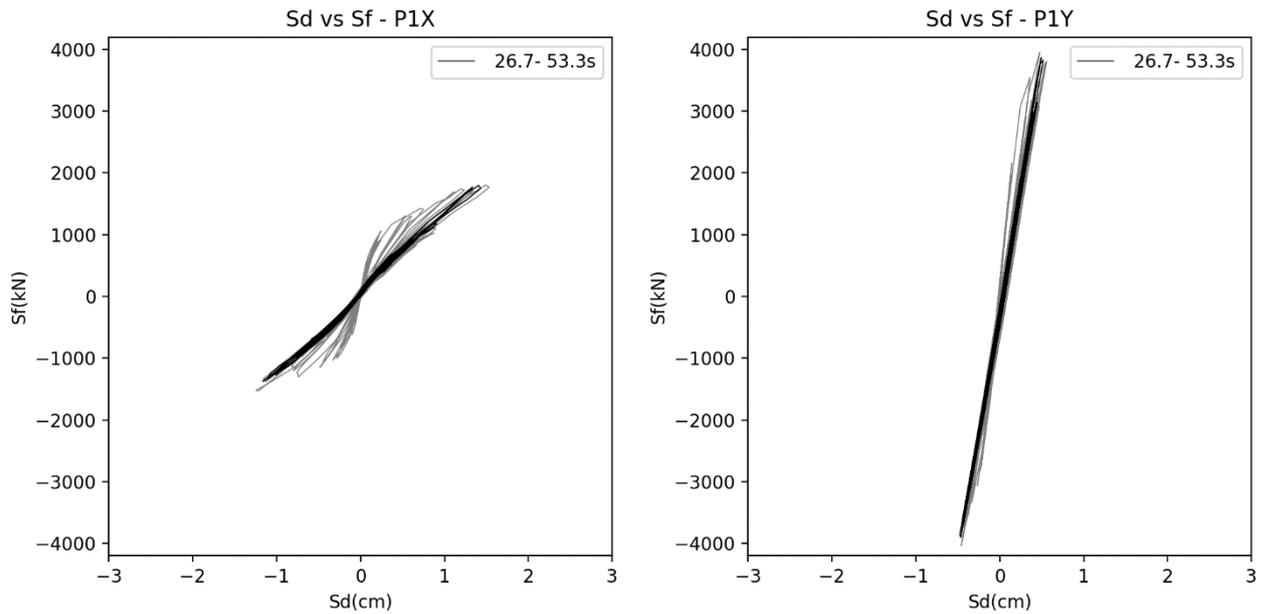


Figura 57. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

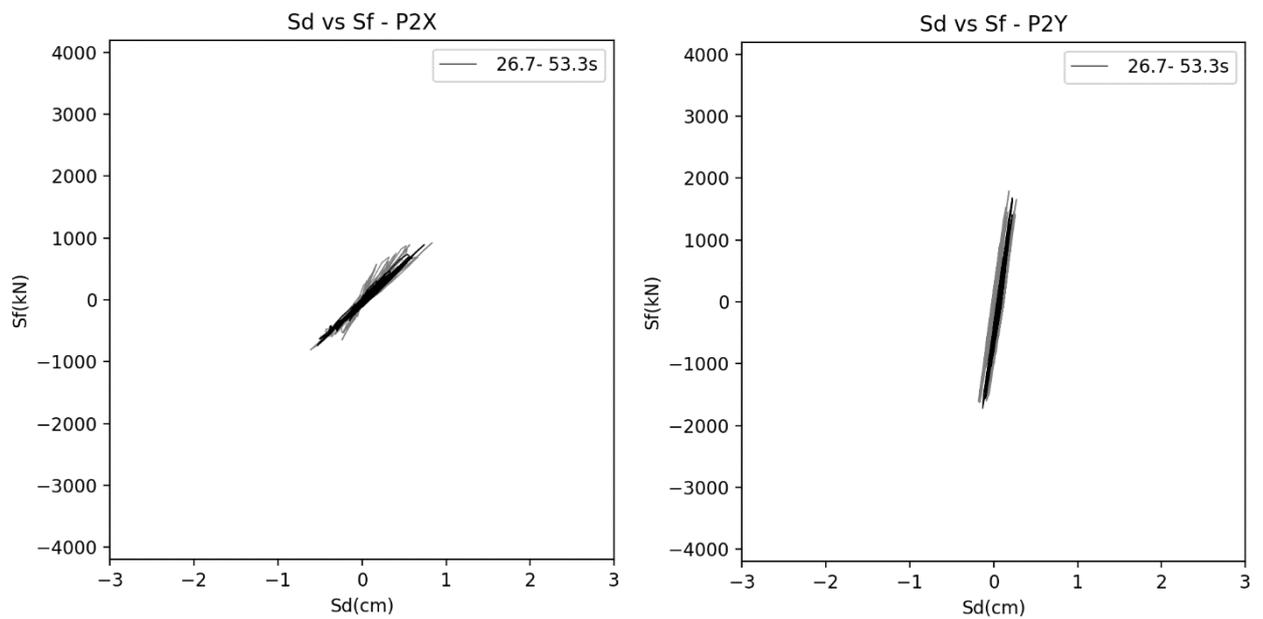


Figura 58. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ Sismo Huaraz 1970

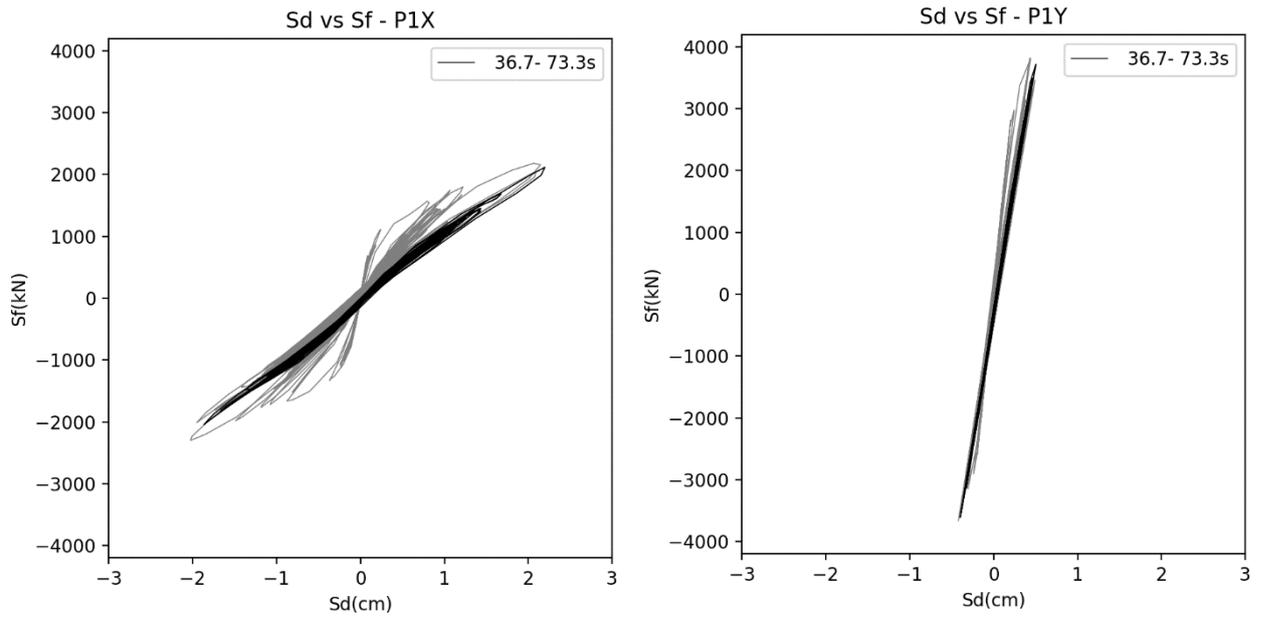


Figura 60. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

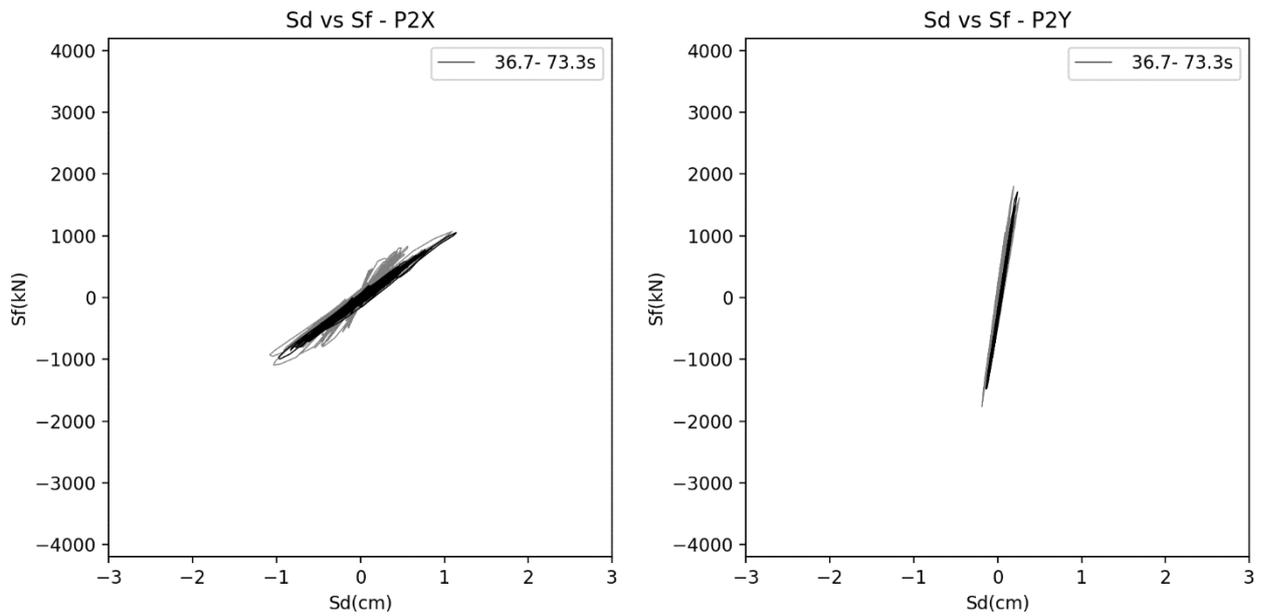


Figura 59. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ Sismo Lima 1974 octubre

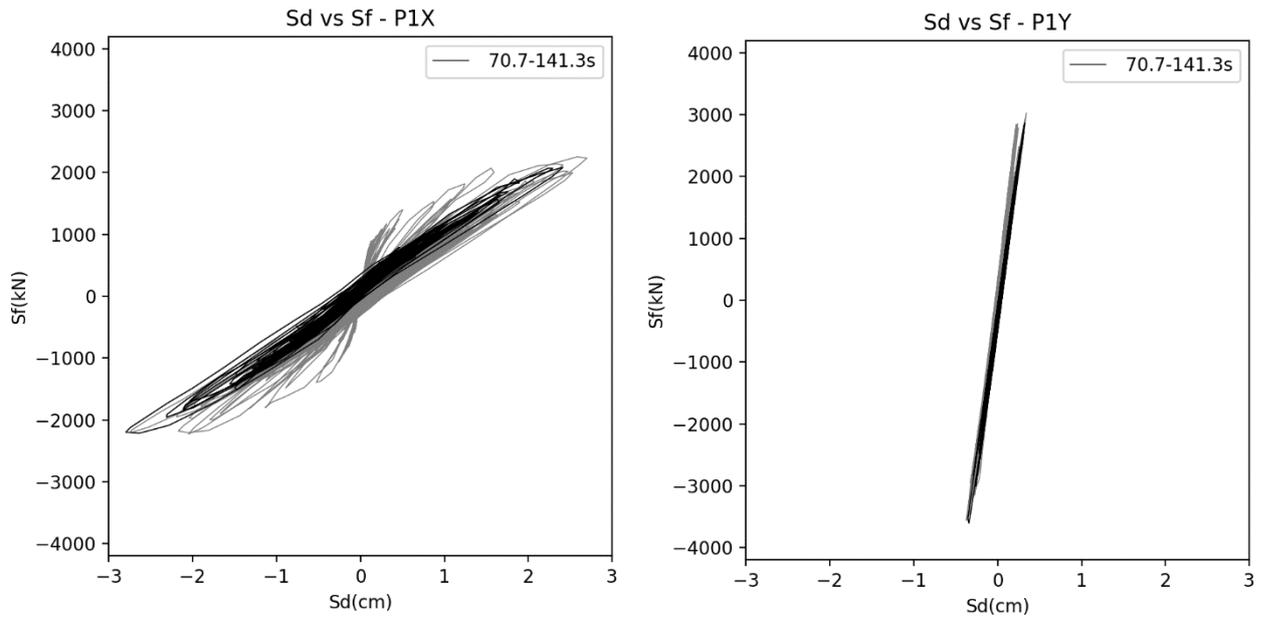


Figura 62. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

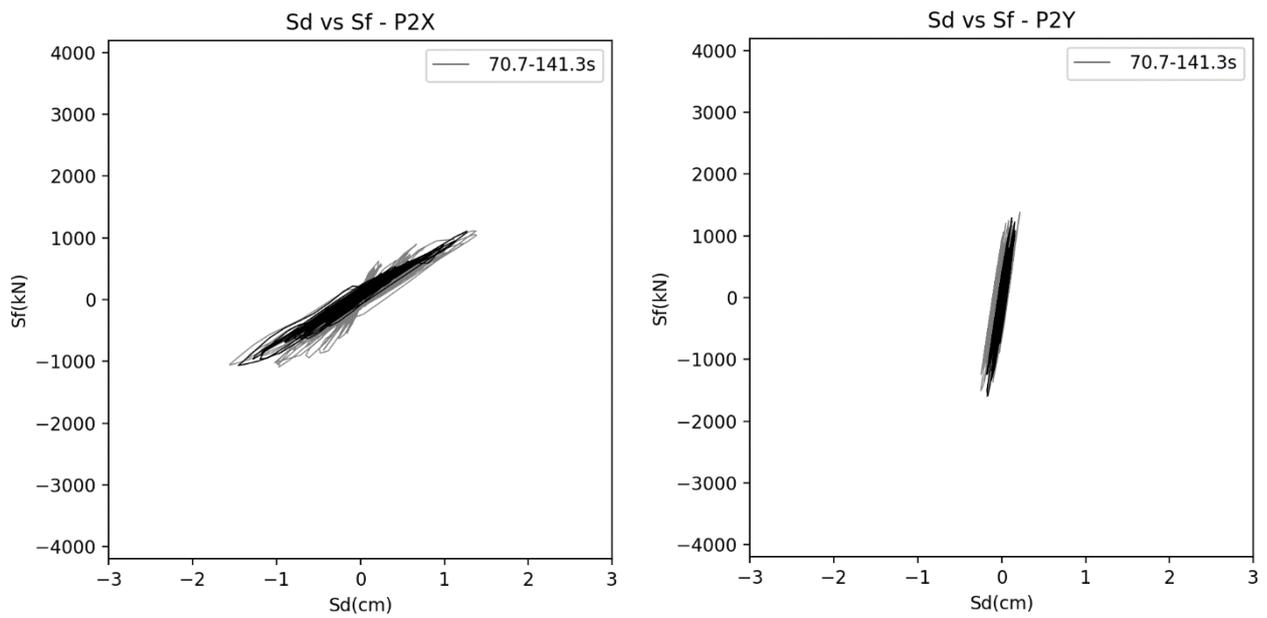


Figura 61. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ Sismo Lima 1974 noviembre

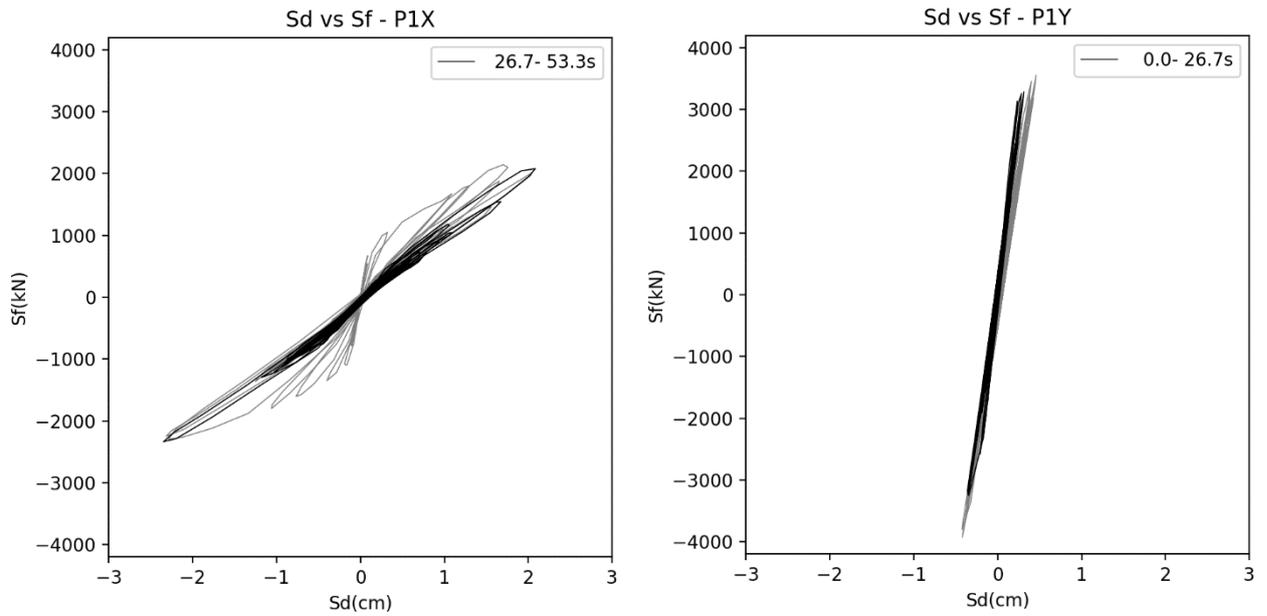


Figura 63. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

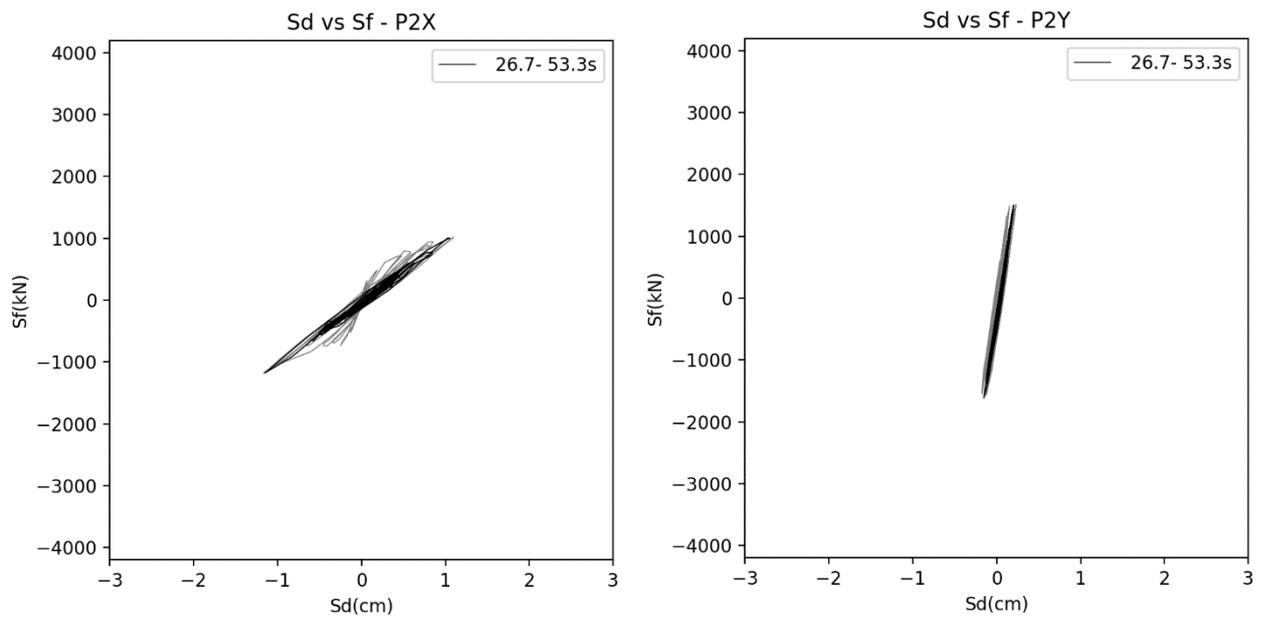


Figura 64. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ **Sismo Iquique 2005**

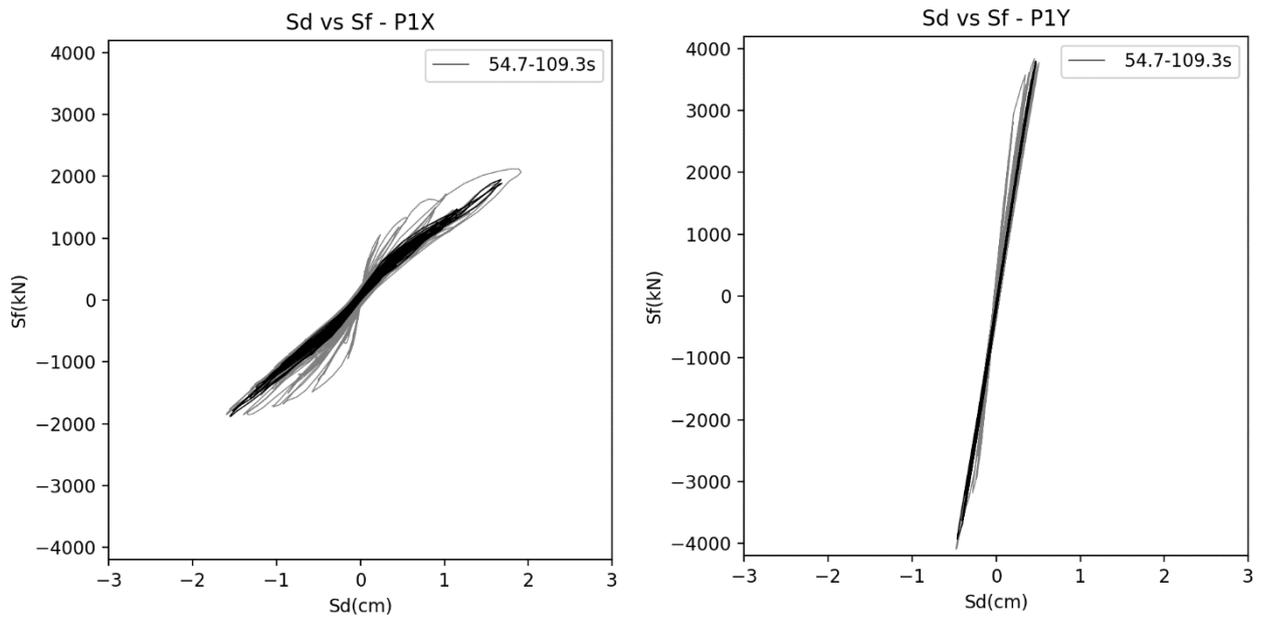


Figura 66. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

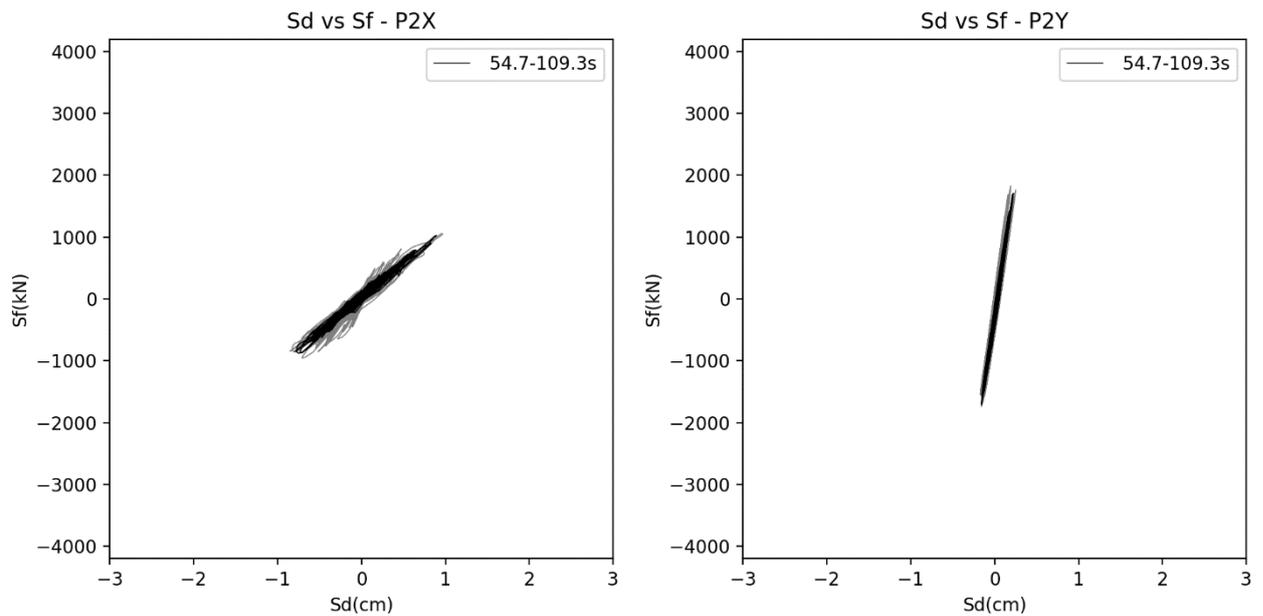


Figura 65. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

Sismo Pisco 2007

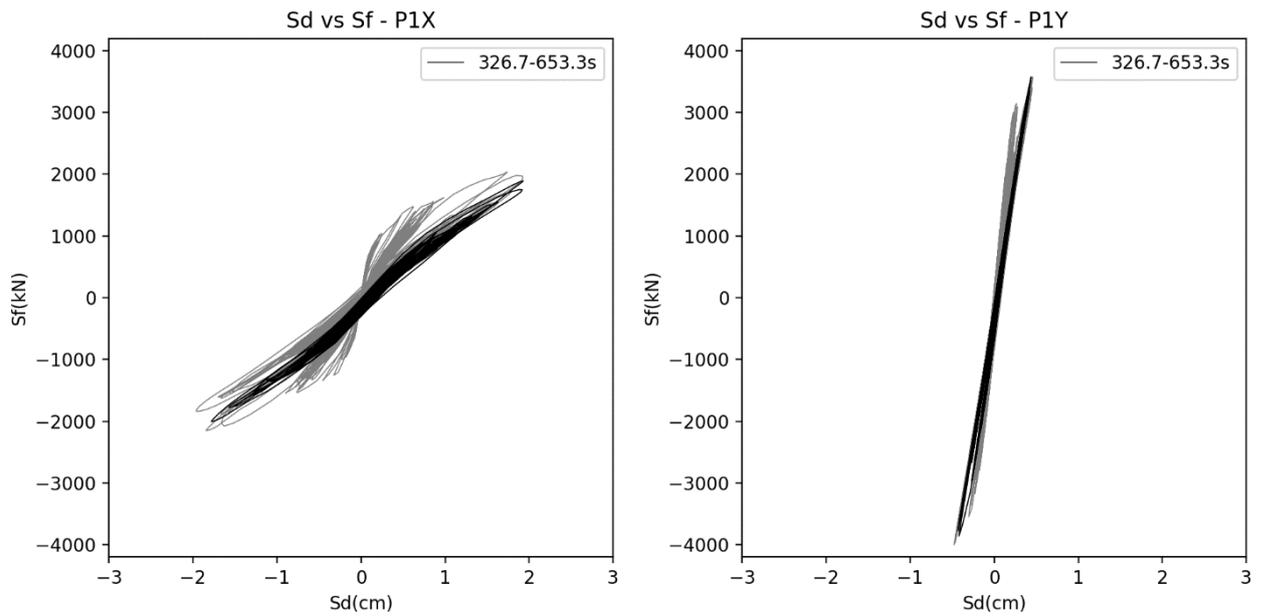


Figura 67. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

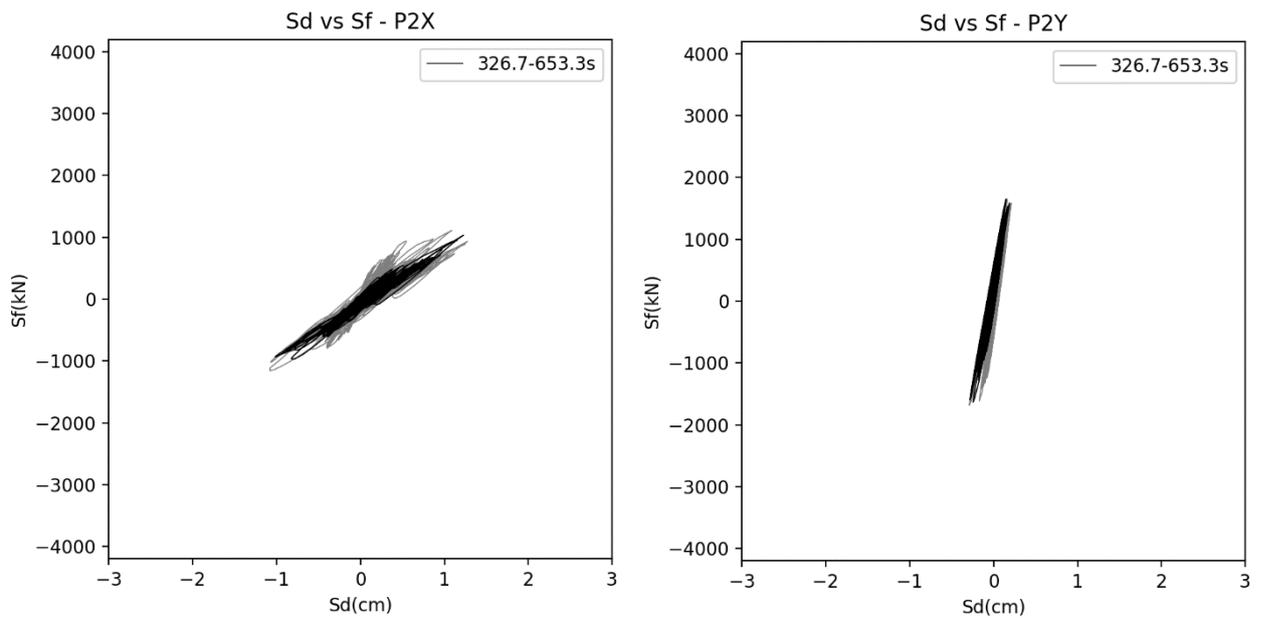


Figura 68. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

✓ Sismo Tacna 2010

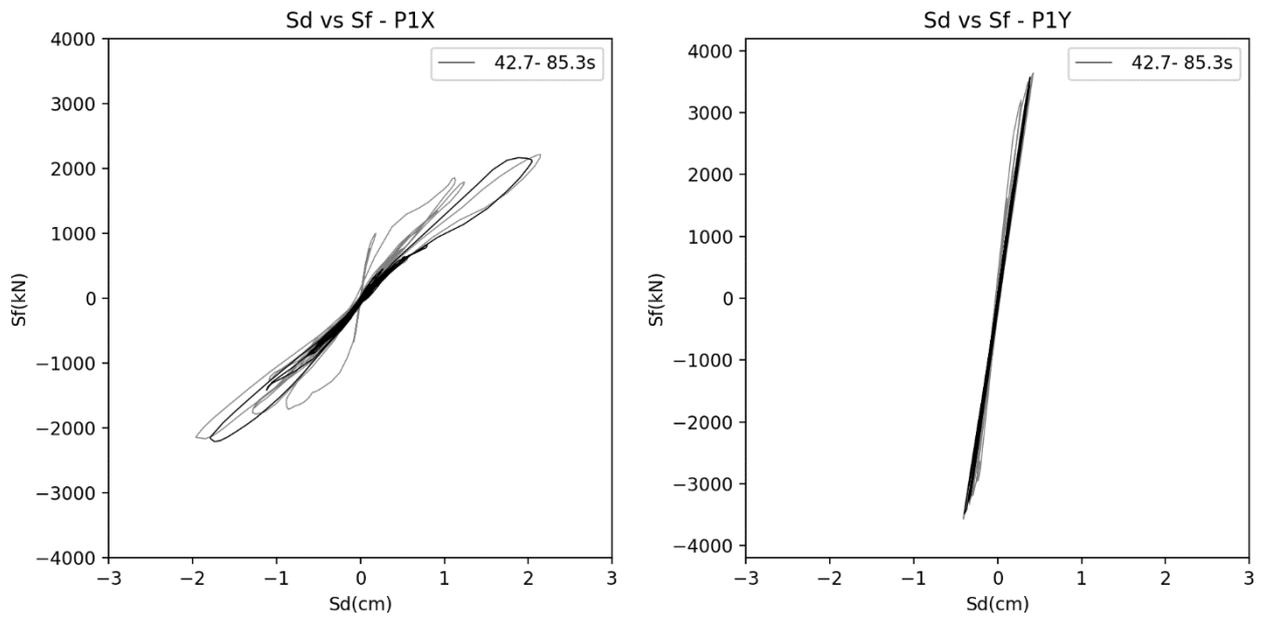


Figura 69. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 01.

Fuente: Elaboración propia. (2021)

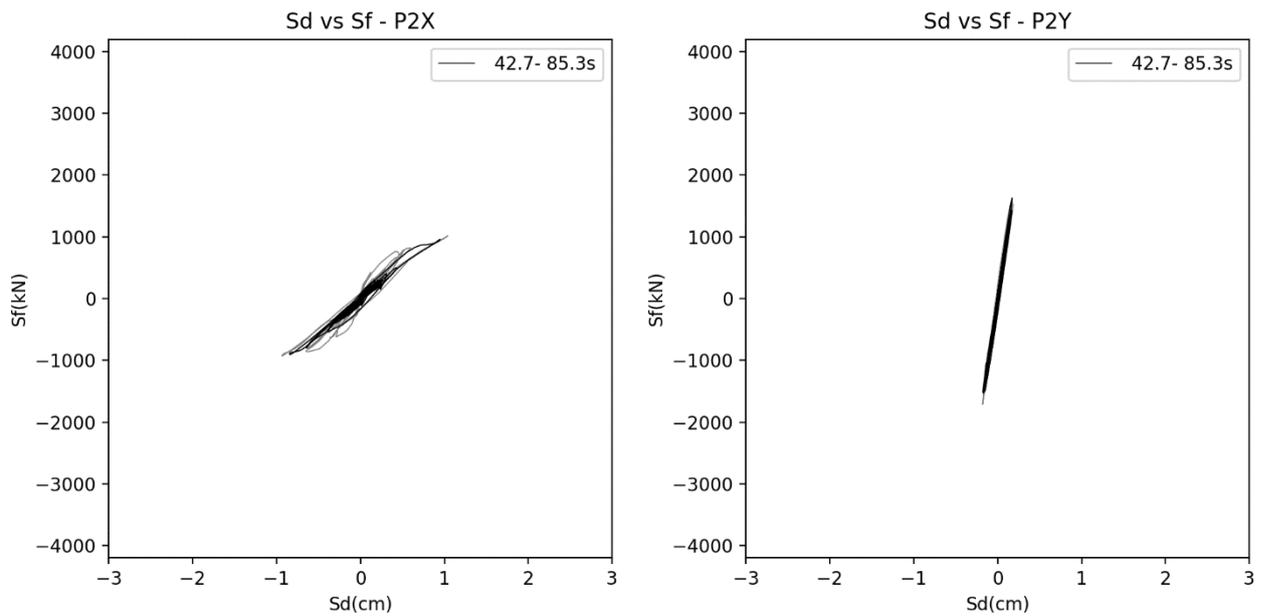


Figura 70. Curvas histeréticas en la dirección longitudinal y transversal, del piso 02.

Fuente: Elaboración propia. (2021)