

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL AMBIENTAL



**Evaluación del desempeño estructural utilizando el análisis no lineal de la
I.E. 10202 “Virgen de la Paz” - Pacora**

**TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL**

AUTOR

Melissa Lizet Cienfuegos Villanueva

ASESOR

Jose Alberto Acero Martinez

<https://orcid.org/0000-0003-4154-9510>

Chiclayo, 2022

**Evaluación del desempeño estructural utilizando el análisis no
lineal de la I.E. 10202 “Virgen de la Paz” - Pacora**

PRESENTADA POR:

Melissa Lizet Cienfuegos Villanueva

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de
INGENIERO CIVIL AMBIENTAL

APROBADA POR:

Luis Alberto Vidal Meza
PRESIDENTE

Gabriel Cachi Cerna
SECRETARIO

Jose Alberto Acero Martinez
VOCAL

Dedicatoria

Mi tesis la dedico con mucho amor a mis padres, por aquellos momentos difíciles en los que me encontraba y ellos siempre estuvieron allí apoyándome, por sus maravillosos consejos de superación, sin ellos no hubiera podido llegar a donde estoy ahora. A mis tías, primos, a mi abuelita quienes con sus palabras de aliento me animaban a seguir adelante y siempre luchar por mis metas. A mis amigos, y a mi persona favorita, quienes sin esperar nada a cambio, estuvieron allí conmigo en las buenas y en las malas, apoyándome a que este sueño se haga realidad.

Agradecimientos

Primeramente, quiero agradecer a Dios por haberme ayudado a cumplir una de mis metas trazadas, a mis padres, familiares, amigos quienes caminaron conmigo en todo momento, fueron mi inspiración, soporte y fortaleza. A mi mentor de tesis el Ing. José Alberto Acero Martínez, al Ing. Segundo Guillermo Carranza Cieza, por su orientación, por ser mi guía en todo el proceso de esta investigación.

Índice

Resumen	17
Abstract	18
Introducción	19
Revisión de literatura.....	20
Antecedentes del problema	20
Bases teórico científicas.....	23
Bases legales.....	23
Criterios sísmicos.....	24
Riesgo sísmico.....	24
Vulnerabilidad.....	24
Peligro sísmico	24
Nivel de desempeño de la edificación.....	24
Nivel de desempeño Propuesta del Comité Visión 2000	24
Disposiciones del Reglamento Nacional de Edificaciones	26
Principios de la Norma Diseño Sismorresistente E.030.....	26
Principios de la Norma Albañilería E.070	29
Comportamiento uniaxial para el concreto y acero de refuerzo.....	31
Modelo de esfuerzo deformación para el acero de refuerzo	31
Modelo de esfuerzo deformación para el concreto no confinado	32
Modelo de esfuerzo deformación para el concreto confinado	32
Tipos de plasticidad para concreto armado y albañilería.....	33
Análisis estático no lineal “pushover”	34
Procedimiento del análisis.....	34

Método de los coeficientes para determinar el punto de desempeño	37
Verificación del desempeño según el SEAOC	39
Análisis dinámico no lineal tiempo historia	39
Materiales y métodos	40
Tipo y nivel de investigación	40
Diseño de investigación	40
Población, muestra, muestreo.....	40
Criterios de selección	40
Operacionalización de variables.....	41
Técnicas e instrumentos de recolección de datos	41
Procedimientos	42
Plan de procesamiento y análisis de datos	43
Matriz de consistencia.....	44
Consideraciones éticas	45
Resultados y discusión	45
Resultados	45
Módulo 01 de la Institución Educativa	45
Análisis de fuerzas estáticas equivalentes	50
Análisis Dinámico Modal Espectral.....	52
Períodos y participación modal	55
Control de distorsiones.....	55
Verificación de irregularidades	56
Fuerza cortante mínima.....	57

Verificación del sistema estructural de albañilería confinada.....	57
Análisis estático no lineal.....	59
Propiedades no lineales de los materiales	59
Asignación de rótulas plásticas en los elementos estructurales	63
Casos de carga.....	64
Curva de capacidad de la estructura.....	66
Punto de desempeño.....	67
Evaluación del desempeño sísmico.....	71
Análisis dinámico no lineal	72
Registros sísmicos	73
Resultados del análisis no lineal dinámico tiempo historia.....	75
Comparación de resultados de los análisis no lineales.....	80
Módulo 02 de la Institución Educativa	82
Análisis de fuerzas estáticas equivalentes	85
Análisis dinámico modal espectral.....	85
Períodos y participación modal	88
Control de distorsiones.....	88
Verificación de irregularidades	89
Fuerza cortante mínima.....	90
Verificación del sistema estructural de albañilería confinada.....	90
Análisis estático no lineal.....	92
Curva de capacidad de la estructura	92
Punto de desempeño.....	93
Evaluación del desempeño sísmico.....	97
Análisis dinámico no lineal	98

Señales sísmicas compatibles con el espectro elástico.....	98
Resultados del análisis no lineal dinámico tiempo historia.....	99
Comparación de resultados de los análisis no lineales.....	104
Discusión.....	105
Conclusiones	107
Recomendaciones.....	110
Referencias bibliográficas	111
Anexos.....	114
Anexo 01: Procedimiento computacional del Módulo 02.....	114
Anexo 02: Desempeño estructural del módulo 02 - Propiedades reducidas	124

Lista de ilustraciones

Ilustración 1: Objetivo de diseño de la Norma E.030 según el criterio de Visión 2000	26
Ilustración 2: Sismicidad del territorio peruano según la Norma del 2019.....	27
Ilustración 3: Aceleración máxima en la estructura	27
Ilustración 4: Curva esfuerzo - deformación modelo Trilineal	31
Ilustración 5: Curva esfuerzo - deformación del concreto no confinado - modelo de Mander	32
Ilustración 6: Curva esfuerzo - deformación del concreto confinado - modelo de Mander.....	32
Ilustración 7: Modelos de plasticidad concentrada y plasticidad distribuida.....	33
Ilustración 8: Modelo no lineal del muro de albañilería	34
Ilustración 9: Curva de capacidad	35
Ilustración 10: Criterio de áreas iguales	36
Ilustración 11: Zona de desplazamientos elásticos e inelásticos de la estructura	37
Ilustración 12: Representación bilineal de la curva de capacidad.....	38
Ilustración 13: Sectorización de la curva de capacidad según el SEAOC	39
Ilustración 14: Fachada interior de la Institución Educativa.....	46
Ilustración 15: Aislamiento tabique - elemento estructural	46
Ilustración 16: Plano estructural del módulo 01.....	47
Ilustración 17: Columnas y muros de concreto armado del módulo 01.....	48
Ilustración 18: Diafragma rígido módulo 01	50
Ilustración 19: Modelamiento del módulo 01 en Etabs.....	51
Ilustración 20: Datos del espectro de pseudo aceleración X - módulo 01	53

Ilustración 21: Espectro de seudo aceleración X - módulo 01	53
Ilustración 22: Datos del espectro de seudo aceleración Y - módulo 01	54
Ilustración 23: Espectro de seudo aceleración Y - módulo 01	54
Ilustración 24: Densidad mínima de muros portantes - módulo 01	57
Ilustración 25: Cálculo del esfuerzo axial máximo - módulo 01	58
Ilustración 26: Control de fisuración - módulo 01	59
Ilustración 27: Sección de columna 0.25 x 0.25 m	59
Ilustración 28: Datos importantes de la columna 0.25 x 0.25 m	60
Ilustración 29: Características del refuerzo de la columna 0.25 x 0.25 m	60
Ilustración 30: Dimensiones del núcleo de la columna 0.25 x 0.25 m	60
Ilustración 31: Cálculo del coeficiente de confinamiento efectivo - columna 0.25 x 0.25 m..	61
Ilustración 32: Esfuerzos de confinamiento y datos para la curva esfuerzo - deformación de la columna 0.25 x 0.25 m	61
Ilustración 33: Curva esfuerzo - deformación de la columna 0.25 x 0.25 m	62
Ilustración 34: Curva esfuerzo deformación del software y cálculo	62
Ilustración 35: Rótulas plásticas en vigas y columnas	63
Ilustración 36: Asignación de rótula a corte en muro de albañilería.....	64
Ilustración 37: Creación de la carga gravitacional no lineal	64
Ilustración 38: Creación de la carga monotónica no lineal en la dirección X.....	65
Ilustración 39: Control de desplazamiento en la dirección X	66
Ilustración 40: Curva de capacidad dirección X - módulo 01	66
Ilustración 41: Curva de capacidad dirección Y - módulo 01	67

Ilustración 42: Punto de desempeño en la dirección X - módulo 01.....	69
Ilustración 43: Punto de desempeño en la dirección Y - módulo 01.....	71
Ilustración 44: Desempeño estructural dirección X - módulo 01.....	72
Ilustración 45: Desempeño estructural dirección Y - módulo 01.....	72
Ilustración 46: Espectro elástico	73
Ilustración 47: Espectros de acelerogramas sin escalar	74
Ilustración 48: Espectro de respuesta de acelerogramas compatibles – módulo 01.....	75
Ilustración 49: Cortante basal - sismo Lima 1966 - dirección X – módulo 01	75
Ilustración 50: Desplazamiento - sismo Lima 1966 - dirección X – módulo 01	76
Ilustración 51: Cortante basal - sismo Lima 1966 - dirección Y – módulo 01	76
Ilustración 52: Desplazamiento - sismo Lima 1966 - dirección Y – módulo 01	76
Ilustración 53: Cortante basal - sismo Lima 1974 – dirección X – módulo 01.....	77
Ilustración 54: Desplazamiento – sismo Lima 1974 – dirección X – módulo 01	77
Ilustración 55: Cortante basal - sismo Lima 1974 - dirección Y – módulo 01	77
Ilustración 56: Desplazamiento - sismo Lima 1974 – dirección Y – módulo 01.....	78
Ilustración 57: Cortante basal - sismo Pisco 2007 - dirección X – módulo 01	78
Ilustración 58: Desplazamiento - sismo Pisco 2007 - dirección X – módulo 01	78
Ilustración 59: Cortante basal - sismo Pisco 2007 - dirección Y – módulo 01	79
Ilustración 60: Desplazamiento - sismo Pisco 2007 - dirección Y – módulo 01	79
Ilustración 61: Comparación de derivas de los análisis no lineales - dirección X - módulo 01	81

Ilustración 62: Comparación de derivas de los análisis no lineales - dirección Y - módulo 01	81
Ilustración 63: Fachada interior del módulo 02 de la Institución Educativa.....	82
Ilustración 64: Plano estructural del módulo 02.....	83
Ilustración 65: Diafragma rígido módulo 02.....	84
Ilustración 66: Espectro de pseudo aceleración X - módulo 02.....	86
Ilustración 67: Espectro de pseudo aceleración Y - módulo 02.....	87
Ilustración 68: Densidad mínima de muros portantes - módulo 02	90
Ilustración 69: Cálculo del esfuerzo axial máximo - módulo 02	91
Ilustración 70: Control de fisuración - módulo 02	91
Ilustración 71: Curva de capacidad dirección X - módulo 02.....	92
Ilustración 72: Curva de capacidad dirección Y - módulo 02.....	92
Ilustración 73: Punto de desempeño en la dirección X - módulo 02.....	94
Ilustración 74: Punto de desempeño en la dirección Y - módulo 02.....	96
Ilustración 75: Desempeño estructural dirección X - módulo 02.....	97
Ilustración 76: Desempeño estructural dirección Y - módulo 02.....	97
Ilustración 77: Espectro de respuesta de acelerogramas compatibles - módulo 02	98
Ilustración 78: Cortante basal - sismo lima 1966 - dirección X - módulo 02	99
Ilustración 79: Desplazamiento - sismo lima 1966 - dirección X - módulo 02	99
Ilustración 80: Cortante basal - sismo lima 1966 - dirección Y - módulo 02	99
Ilustración 81: Desplazamiento - sismo Lima 1966 - dirección Y - módulo 02	100
Ilustración 82: Cortante basal - sismo Lima 1974 - dirección X - módulo 02.....	100

Ilustración 83: Desplazamiento - sismo Lima 1974 - dirección X - módulo 02	100
Ilustración 84: Cortante basal - sismo Lima 1974 - dirección Y - módulo 02	101
Ilustración 85: Desplazamiento - sismo Lima 1974 - dirección Y - módulo 02	101
Ilustración 86: Cortante basal - sismo Pisco 2007 - dirección X - módulo 02	101
Ilustración 87: Desplazamiento - sismo Pisco 2007 - dirección X - módulo 02	102
Ilustración 88: Cortante basal - sismo Pisco 2007 - dirección Y - módulo 02	102
Ilustración 89: Desplazamiento - sismo Pisco 2007 - dirección Y - módulo 02	102
Ilustración 90: Comparación de derivas de los análisis no lineales - dirección X - módulo 02	104
Ilustración 91: Comparación de derivas de los análisis no lineales - dirección Y - módulo 02	105

Lista de tablas

Tabla 1: Nivel de desempeño Propuesta del Comité Visión 2000.....	25
Tabla 2: Factor de zona según la Norma E.030	26
Tabla 3: Espesor mínimo efectivo del muro portante	30
Tabla 4: Operacionalización de variables	41
Tabla 5: Propiedades mecánicas de los materiales.....	48
Tabla 6: Carga muerta módulo 01	49
Tabla 7: Carga viva módulo 01	49
Tabla 8: Masa del módulo 01	51
Tabla 9: Cálculo de la cortante basal módulo 01	52
Tabla 10: Participación modal -módulo 01	55
Tabla 11: Períodos y participación modal – módulo 01.....	55
Tabla 12: Control de distorsiones módulo 01	55
Tabla 13: Irregularidad de piso blando - módulo 01	56
Tabla 14: Irregularidad torsional - módulo 01	56
Tabla 15: Fuerza cortante mínima - módulo 01	57
Tabla 16: Datos para la curva bilineal dirección X - módulo 01	69
Tabla 17: Datos para la curva bilineal dirección Y - módulo 01	71
Tabla 18: Registros sísmicos para el análisis dinámico no lineal	73
Tabla 19: Rango de períodos para el espectro compatible – módulo 01.....	74
Tabla 20: Cortante y desplazamiento - análisis no lineal dinámico tiempo historia - dirección X – módulo 01.....	79

Tabla 21: Cortante y desplazamiento - análisis no lineal dinámico tiempo historia - dirección Y – módulo 01.....	80
Tabla 22: Derivas - análisis no lineal dinámico tiempo historia – módulo 01.....	80
Tabla 23: Derivas del análisis no lineal – dirección X – módulo 01	80
Tabla 24: Derivas del análisis no lineal - dirección Y - módulo 01	81
Tabla 25: Carga muerta módulo 02.....	84
Tabla 26: Carga viva módulo 02	84
Tabla 27: Masa del módulo 02.....	85
Tabla 28: Cálculo de la cortante basal módulo 02	85
Tabla 29: Datos del espectro de pseudo aceleración X - módulo 02	86
Tabla 30: Datos del espectro de pseudo aceleración Y - módulo 02	87
Tabla 31: Participación modal - módulo 02	88
Tabla 32: Períodos y participación modal - módulo 02	88
Tabla 33: Control de distorsiones módulo 02	88
Tabla 34: Irregularidad de piso blando - módulo 02.....	89
Tabla 35: Irregularidad torsional - módulo 02	89
Tabla 36: Fuerza cortante mínima - módulo 02	90
Tabla 37: Datos para la curva bilineal dirección X - módulo 02	94
Tabla 38: Datos para la curva bilineal dirección Y - módulo 02	96
Tabla 39: Rango de periodos para el espectro compatible - módulo 02	98
Tabla 40: Cortante y desplazamiento - análisis no lineal dinámico tiempo historia - dirección X - módulo 02	103

Tabla 41: Cortante y desplazamiento - análisis no lineal dinámico tiempo historia - dirección Y - módulo 02	103
Tabla 42: Derivas - análisis no lineal dinámico tiempo historia - módulo 02	103
Tabla 43: Derivas del análisis no lineal - dirección X - módulo 02.....	104
Tabla 44: Derivas del análisis no lineal - dirección Y - módulo 02.....	104

Resumen

La tesis es de diseño no experimental y explicativa, tiene por objetivo la evaluación del desempeño estructural utilizando el análisis no lineal con fines de reforzamiento de la I.E. 10202 “Virgen de la Paz” – Pacora, usando como herramienta el software Etabs. Se inicia con el estudio del expediente técnico, seleccionando los módulos a evaluar, identificando materiales, secciones de elementos y sistemas estructurales. Con el Pushover se obtiene la curva de capacidad, el módulo 01 presenta una cortante última de 238.28 tn y desplazamiento de 15 cm y una cortante última de 471.78 tn y desplazamiento de 5 cm, en la dirección X e Y, llegando a un nivel de desempeño de resguardo de vida; el módulo 02 tiene una cortante de 357.48 tn y desplazamiento de 5 cm y una cortante 201.02 tn y desplazamiento de 13.5 cm, en la dirección X e Y, llegando a un nivel de desempeño operativo para el sismo máximo. Para el análisis dinámico no lineal se utilizó los registros sísmicos de Lima 1966, Lima 1974 y Pisco 2007, los cuales fueron escalados y compatibles con el espectro elástico que indica la Norma E.030, obteniendo una deriva promedio para el primer módulo de 0.012 y 0.004; y para el segundo módulo de 0.002 y 0.007 en las direcciones X e Y, mencionando que se asemejan mucho a las derivas obtenidas del Pushover. Concluimos que la estructura presenta un buen desempeño y no requiere ningún tipo de reforzamiento.

Palabras clave: desempeño estructural, análisis no lineal, resguardo de vida, operativo, cortante, desplazamiento.

Abstract

The thesis is of a non-experimental and explanatory design, its objective is the evaluation of structural performance using non-linear analysis for the purpose of reinforcing the I.E. 10202 “Virgen de la Paz” - Pacora, using the Etabs software as a tool. It begins with the study of the technical file, selecting the modules to be evaluated, identifying materials, sections of elements and structural systems. With the Pushover the capacity curve is obtained, module 01 presents an ultimate shear of 238.28 tn and displacement of 15 cm and an ultimate shear of 471.78 tn and displacement of 5 cm, in the X and Y direction, reaching a level of life guard performance; Module 02 has a shear of 357.48 tn and displacement of 5 cm and a shear 201.02 tn and displacement of 13.5 cm, in the X and Y direction, reaching an operating performance level for the maximum earthquake. For the non-linear dynamic analysis, the seismic records of Lima 1966, Lima 1974 and Pisco 2007 were used, which were scaled and compatible with the elastic spectrum indicated by Standard E.030, obtaining an average drift for the first module of 0.012 and 0.004; and for the second module of 0.002 and 0.007 in the X and Y directions, mentioning that they closely resemble the drifts obtained from the Pushover. We conclude that the structure performs well and does not require any type of reinforcement.

Keywords: structural performance, nonlinear analysis, life safety, operational, shear, displacement.

Introducción

El departamento de Lambayeque se encuentra dentro de la Zonificación Sísmica en la Zona 4, que se interpreta como una zona de alto potencial y riesgo sísmico, de acuerdo con la Norma E.030. El silencio que existe hasta la fecha hace suponer un presente evento sísmico considerable en cualquier momento. Teniendo en cuenta los sismos más destructivos que se han presentado: Sismo del 8 de mayo de 1951 con una intensidad estimado en IV en Chiclayo; Sismo de 7 de febrero de 1959 con una intensidad VI alarmando a las poblaciones de Tumbes, Piura y Chiclayo; Sismo del 3 de febrero de 1969 con una intensidad de VII, Sismo del 31 de mayo de 1970 con una intensidad de VI y últimamente se han registrado sismos de baja magnitud. Sabiendo que el Perú es uno de los países que se ubica en la zona sísmica más activa del mundo, en el llamado “Cinturón de Fuego”, muchas de las estructuras solo se dimensionan para cargas gravitacionales, es decir, para cargas estáticas que actúan sobre el elemento estructural, no teniendo en cuenta, que las acciones sísmicas provocan cargas dinámicas que muchas veces la estructura es incapaz de resistir.

En justificación técnica, la presente tesis es fundamental porque va a utilizar el análisis no lineal estático y dinámico con la finalidad de conocer mejor el comportamiento de la estructura sometida a cargas sísmicas. El primer análisis consiste en aplicar cargas laterales incrementadas hasta llevar al colapso la estructura, y se podrá conocer el comportamiento de los materiales, elementos y de la estructura en general. El análisis dinámico no lineal consiste en la aplicación de señales sísmicas, las cuales deben ser escaladas a un espectro elástico.

Asimismo, en justificación social esta investigación es importante porque la estructura debe proporcionar a sus habitantes (estudiantes y personas que laboran en este centro educativo), una seguridad plena en caso de presentarse una acción sísmica. Además, este tipo de estructura puede servir a la población como centro de refugio después de un desastre. Con la aplicación del análisis no lineal podremos determinar el desempeño sísmico de la estructura en realidad y analizar los resultados, evaluando si es necesario una alternativa de reforzamiento. Todo esto permitirá a los ocupantes de la edificación tener suficiente tiempo de evacuación en caso de darse un sismo severo.

El presente proyecto tiene por objetivo general la evaluación del desempeño estructural utilizando el análisis no lineal con fines de reforzamiento de la I.E. 10202 “Virgen de la Paz”

– Pacora, y por objetivos específicos aplicar el análisis estático no-lineal “Pushover” y el análisis dinámico no lineal a la estructura; obtener la curva de capacidad para poder determinar el punto de desempeño de la estructura; evaluar el nivel de desempeño sísmico de la edificación utilizando ambos análisis no lineales; elegir la mejor alternativa de reforzamiento, después de analizar los resultados obtenidos del análisis; realizar una comparación del análisis no lineal dinámico con el análisis no lineal estático Pushover.

Revisión de literatura

Antecedentes del problema

Existen amplias investigaciones del tema a tratar, tanto a nivel nacional como internacional.

Tesis Pregrado: Análisis estático no lineal y evaluación del desempeño sísmico de un edificio de 8 niveles diseñado con la Norma E.030. Arequipa. 2019.

En la tesis se realizó dos modelos, uno de pórticos y otro de muros estructurales, con la finalidad de estudiar mejor el comportamiento de las estructuras frente a distintos niveles de amenaza sísmica. Para el modelamiento se utilizó el software ETABS, luego se diseñó las estructuras, seguidamente se realiza el Análisis Estático No lineal, obteniéndose la curva de capacidad de cada sistema estructural, así como la formación de rótulas plásticas en sus elementos. Para determinar el punto de desempeño de la estructura se utilizó dos métodos: Espectro de Capacidad (ATC-40, FEMA 440) y el de Coeficientes (FEMA 440, ASCE/SEI 41-13). Además, se evaluó la estructura teniendo en cuenta ciertas recomendaciones por el Comité Visión 2000 y el ATC-40. En el análisis del sistema aporticado, el desplazamiento último antes del colapso es de 39.43 cm en la dirección X y de 33.79 cm en la dirección Y. Asimismo en el sistema de muros estructurales el desplazamiento es de 26.03 cm en la dirección X y de 21.72 cm en la dirección Y [1].

Tesis Pregrado: Desempeño sísmico de un edificio de cinco niveles de concreto armado mediante el análisis estático no lineal “Pushover”. Huaraz. 2018.

La tesis evalúa un edificio mediante el análisis estático no lineal, el procedimiento es obtener la curva de capacidad mediante la aplicación de cargas laterales incrementales, después se determina el punto de desempeño (intersección entre el Espectro de Capacidad y el Espectro de Demanda). Primero se realiza el diseño de la estructura, luego se define la no linealidad de los elementos estructurales y la creación de las cargas incrementales, obteniendo la curva de

capacidad. El primer tramo de la curva presenta una linealidad hasta una cortante basal de 505 tn y un desplazamiento aproximadamente de 1 cm en el techo. Luego se observa que la cortante máxima que soporta la estructura es de 1406 tn con un desplazamiento de 15.62 cm. Teniendo en cuenta la demanda que proporciona la Norma de Diseño Sismorresistente E.030. para un sismo de diseño y un sismo máximo, la estructura presenta un buen comportamiento, encontrándose en un nivel de seguridad de vida [2].

Tesis Pregrado: Diseño por desempeño de un edificio de hormigón armado utilizando el método de análisis Tiempo-Historia. Ecuador. 2017.

En la tesis se realiza el diseño de una edificación de 5 pisos y luego se verifica el desempeño de la estructura mediante el análisis no lineal, con la finalidad de saber cuál es su comportamiento frente a un evento sísmico. Para ello se utilizó diferentes normativas: NEC 2015, ACI 2014, FEMA 440, Comité VISION 2000, etc.). El diseño se hizo mediante el análisis modal espectral para posteriormente realizar el análisis no lineal estático y tiempo historia, y con ello comprobar si la estructura se encuentra en el nivel de desempeño esperado. Se llega a la conclusión que la estructura colapsará para un sismo máximo con un periodo de retorno de 2500 años, estos resultados fueron deducidos del análisis no lineal Tiempo – Historia, teniendo un desplazamiento máximo en el centro de masas de 36 cm en la dirección X y de 31 cm en la dirección Y. Se analizó la estructura con este sismo debido a que presenta una ocupación especial [3].

Tesis Pregrado: Análisis no lineal estático: evaluación del desempeño de una estructura de hormigón y una de acero diseñada usando los códigos ASCE 7-10 y NEC 11 mediante el código ASCE 41 -06. Quito. 2014.

La tesis desarrolla el diseño de dos sistemas estructurales, uno de pórticos de concreto armado y otro de acero, utilizando normativas como: ASCE/SEI 7-10 y NEC-11. Después se verifica el desempeño de las estructuras utilizando el análisis no lineal estático, y para determinar el punto de desempeño se basan en el método de los coeficientes. Con el objetivo de tener un mejor comportamiento de la no linealidad de los elementos, se usa modelos de plasticidad reducida y rotación en la cuerda [4].

Tesis Pregrado: Desempeño estructural aplicando la Norma ATC-40 para el reforzamiento del pabellón “Monoblock” del Instituto Nacional de Salud del Niño (Breña – Lima). Lima. 2016.

En la tesis se estudiará un hospital de 15 pisos en la ciudad de Lima teniendo en consideración la normativa ATC-40, con el fin de darle un excelente reforzamiento a la estructura. El primer bloque se encuentra en un nivel de desempeño de seguridad limitada con un desplazamiento de 61 cm en la dirección X y de 40.7 cm en la dirección Y. El segundo bloque se encuentra en daño controlado con un desplazamiento de 15.6 cm en la dirección X y de 14.3 cm en la dirección Y. Con los resultados mostrados anteriormente nos damos cuenta, que el primer bloque necesita reforzamiento, por lo cual se propone el uso de disipadores de energía de tipo viscoso, reduciendo notablemente los desplazamientos y llevando a la edificación a un nivel de desempeño de daño controlado. Cabe rescatar que por ser un hospital se le aplicó una demanda de sismo severo, con ello se realizó el análisis correspondiente [5].

Tesis de Master: Evaluación del desempeño sísmico de un edificio de once pisos utilizando análisis estático y dinámico no-lineal. Tacna. 2017.

En la tesis se analiza la edificación mediante el análisis no lineal con el fin de encontrar sus zonas débiles, para ello se usa las normativas del FEMA y ATC-40. El procedimiento consta en primer lugar, aplicar lo que indica la Norma E.030, después determinar la curva de capacidad en cada sentido y luego calcular el punto de desempeño de la estructura, para este último procedimiento se utilizó el método de los coeficientes. Los resultados muestran que en el análisis estático no lineal la estructura tuvo un desplazamiento en el último nivel de 2.85 cm en la dirección X y de 3.46 cm en la dirección Y. Para el análisis dinámico no lineal se tuvo un desplazamiento de 2.97 cm en la dirección X y de 3.29 cm en la dirección Y. Con ello se deduce que la edificación se encuentra en el nivel de ocupación inmediata, teniendo mínimo daño en sus elementos estructurales [6].

Tesis Pregrado: Desempeño sísmico por el método Push-over de un edificio construido en la ciudad de Barranquilla bajo la Norma NSR – 10. Barranquilla. 2017.

En la tesis se analizó un edificio mediante el análisis estático no lineal – Pushover, y para el modelamiento de la estructura se utilizó el software Etabs. Los resultados muestran que para el sismo de diseño la estructura se encuentra en un nivel de desempeño de ocupación inmediata, en donde sus elementos estructurales presentan un daño mínimo. En el primer paso del pushover

se muestra las primeras rotulas plásticas en vigas del primer piso. Después ya se observa la presencia de rotulas plásticas en la base de las columnas y en extremos de vigas en pisos inferiores. En conclusión, la estructura sometida a un sismo de diseño se encontraría totalmente operativa, excepto en los pisos inferiores donde existirá daño mínimo de vigas y columnas [7].

Bases teórico científicas

La tesis en estudio toma en cuenta las siguientes normativas:

Bases legales

Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. 2014. ASCE/SEI 41-13. Virginia

Esta norma describe procedimientos que se usa en el diseño por performance, para evaluar edificios existentes. Plantea un proceso en 3 etapas para evaluación sísmica desde prevención del colapso a la continuidad operacional que une el comportamiento de los elementos estructurales con los elementos no estructurales.

Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. 2005. FEMA 440. Washington

Esta normativa detalla los procedimientos estáticos no lineales, que sirve para el análisis sísmico y evaluación de estructuras. Se tomó en consideración también al FEMA 356 (Rehabilitación sísmica de edificios) y el ATC-40 (Evaluación sísmica y rehabilitación de edificios de hormigón). En la tesis se utilizará el método de los coeficientes para determinar el punto de desempeño.

Reglamento Nacional de Edificaciones. 2009. Norma E.0.60: Concreto Armado. Lima

Esta norma contiene requisitos de los materiales, calidad del concreto, detalles del refuerzo, consideraciones sobre el análisis y diseño de las estructuras, ya sea por flexión, carga axial, cortante y torsión. Todos los proyectos realizados deben cumplir con estas especificaciones técnicas.

Reglamento Nacional de Edificaciones. 2019. Norma E.030: Diseño Sismorresistente. Lima

Esta norma brinda todos los parámetros para un adecuado diseño sismorresistente.

Criterios sísmicos

Riesgo sísmico

Es la posibilidad de que una edificación sufra algún daño a causa del impacto de un peligro, en una localización y en un tiempo dado [8] .

$$\text{Riesgo Sísmico} = \text{Peligro Sísmico} \times \text{Vulnerabilidad}$$

De la ecuación anterior podemos deducir dos casos: la primera es que no existe riesgo si no hay peligro, aun existiendo un alto grado de vulnerabilidad; la segunda es que no hay riesgo si la vulnerabilidad es cero, aun cuando hay peligro.

Vulnerabilidad

En el de ámbito de las estructuras, es la falta de resistencia ante un peligro sísmico. Esto se debe a diferentes factores y una de ellas es la condición de las edificaciones.

Peligro sísmico

En [9] se menciona “Es la posibilidad que en cierta área suceda un evento sísmico con una intensidad igual o superior a un valor fijado”. Depende del periodo de retorno, vida útil de la estructura y de una probabilidad de excedencia.

Nivel de desempeño de la edificación

El fin de realizar una evaluación estructural y determinar su nivel de desempeño es saber cuál es el estado de la estructura en estudio frente a un evento sísmico. Estos niveles están en función de: daño físico de la edificación, seguridad de sus habitantes durante el sismo y funcionalidad de la estructura después del sismo [10].

Nivel de desempeño Propuesta del Comité Visión 2000

Establece 5 niveles de desempeño y se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1: Nivel de desempeño Propuesta del Comité Visión 2000

Nivel de Desempeño	Estado de Daño	Descripción
Totalmente Operacional	Despreciable	La edificación no presenta daños y es totalmente segura para sus habitantes, todos sus servicios se encuentran en buen estado.
Operacional	Leve	Pequeños daños en los elementos estructurales y daño moderado en elementos no estructurales, daños menores en servicios no esenciales y requiere algunas reparaciones para que se encuentre totalmente operativa.
Seguridad de Vida	Moderado	Presenta daño moderado a extensivo en elementos estructurales y no estructurales, esto ocasiona una pérdida de rigidez y capacidad de soportar alguna carga adicional, la estructura necesita una rehabilitación para que siga su operabilidad.
Prevención al Colapso	Severo	La estructura tiene daños severos en elementos estructurales y no estructurales, perdiendo rigidez y resistencia y se encuentra cerca al colapso. Existe riesgo en la seguridad de las personas y su reparación ya no es posible.
Colapso	Completo	La estructura a colapsado total o parcialmente

Fuente: Performance Based Seismic Engineering of Buildings [11].

El objetivo de Diseño de la Norma E.030 según el criterio de Visión 2000 indica que para una edificación esencial expuesta a un sismo máximo con un período de retorno de $T_r = 2500$ años debe encontrarse en un nivel de desempeño de resguardo de vida. En la siguiente ilustración nos damos cuenta que un sismo máximo se obtiene de multiplicar el factor de zona por el factor de uso $U = 1.50$, mencionado en la Norma Técnica E.031 [12] “El sismo máximo se calcula como 1.5 veces el sismo de diseño según la Norma E.030”. Una explicación de ello es que el sismo de diseño tiene un periodo de retorno de 475 años, pero para llevarlo a un sismo máximo que tiene un periodo de retorno de 2500 años se debe multiplicar por 1.50, este factor es el mismo que se utiliza en la Norma E.030 para el uso de edificaciones esenciales.

Ilustración 1: Objetivo de diseño de la Norma E.030 según el criterio de Visión 2000

ACELERACIÓN DEL SUELO (G)	NIVEL DE MOVIMIENTO DEL SISMO	NIVEL DE DESEMPEÑO SÍSMICO DE LOS EDIFICIOS				
		TOTALMENTE OPERACIONAL	OPERACIONAL	RESGUARDO DE VIDA	CERCA AL COLAPSO	COLAPSO
-----	FRECUENTE	Yellow	Orange	Brown	Brown	Red
----	OCASIONAL	Light Green	Yellow	Orange	Brown	Red
0.45g	SISMO DE DISEÑO	Green	Light Green	Yellow	Orange	Red
0.45x1.5=0.675g	SISMO MÁXIMO	Green	Green	Yellow	Yellow	Red

Annotations: A black arrow points down from the 'RESGUARDO DE VIDA' column in the 'FRECUENTE' row to the 'RESGUARDO DE VIDA' column in the 'SISMO DE DISEÑO' row. Two red arrows point from the 'SISMO DE DISEÑO' row to the 'RESGUARDO DE VIDA' and 'CERCA AL COLAPSO' columns. The 'RESGUARDO DE VIDA' cell in the 'SISMO DE DISEÑO' row contains the text: NORMA E030 Edificio Común. The 'RESGUARDO DE VIDA' cell in the 'SISMO MÁXIMO' row contains the text: NORMA E030 Edificio Esencial.

Fuente: Curso Conservación, Intervención, Adecuación y Refuerzo de Construcciones Existentes de la Maestría en Ingeniería Civil PUCP [13].

Disposiciones del Reglamento Nacional de Edificaciones

Principios de la Norma Diseño Sismorresistente E.030

En [14] se especifica el factor de zona como “Aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años”. Para este factor se realizó un estudio de peligro sísmico en todo el territorio peruano, dividiéndolo finalmente en 4 zonas sísmicas, tal como se percibe en la Tabla 2 e Ilustración 2.

Tabla 2: Factor de zona según la Norma E.030

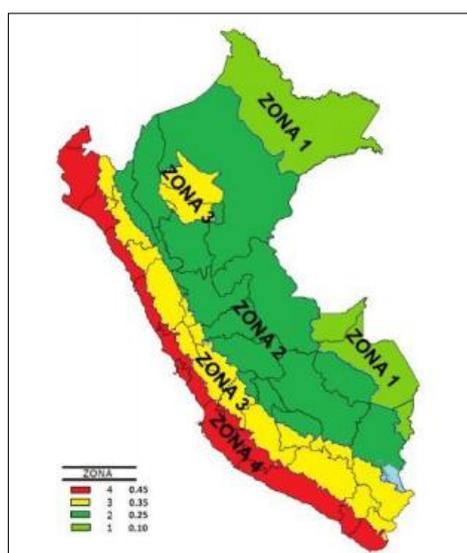
ZONA	FACTOR DE ZONA
1	0.10
2	0.25
3	0.35
4	0.45

Fuente: Norma E.030 [14].

Como se mencionó anteriormente, esta aceleración es en un estrato rocoso, pero para llevarlo a la cimentación de la propia estructura, se hace un estudio de sitio y microzonificación sísmica, debido a que la aceleración varía de acuerdo a la topografía, estratos de suelo y basamento rocoso. Es por ello que en cada proyecto a realizar se debe determinar el perfil del suelo,

empleando la velocidad de ondas de corte, número de golpes del ensayo de Penetración Estándar y la resistencia a corte no drenada. Cabe rescatar que estas propiedades se deben determinar en cada estrato que se encuentre en 30 m por debajo del fondo de cimentación. Teniendo el perfil del suelo determinamos el factor S que se define como el modificador de la aceleración del suelo para un perfil establecido con respecto al S1. Finalmente, la multiplicación ZS es la aceleración máxima en la superficie [15].

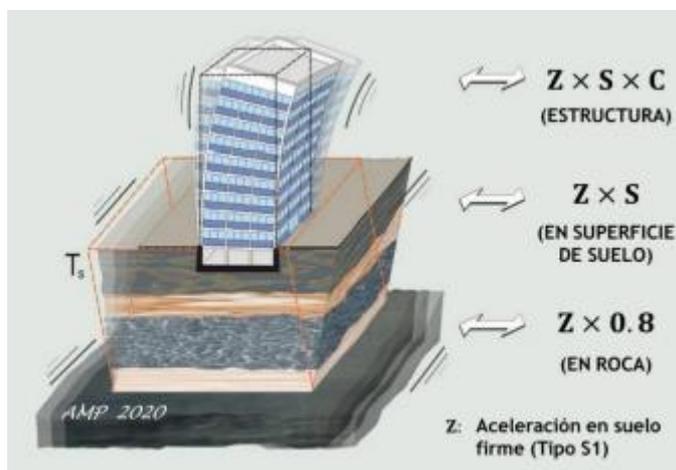
Ilustración 2: Sismicidad del territorio peruano según la Norma del 2019



Fuente: Norma E.030.

Según Muñoz [11, p. 18] indica que el factor de amplificación sísmica (C) es la división entre la aceleración máxima en la estructura y la aceleración en su base. Además este factor se determina en función del periodo de la estructura y los periodos del espectro T_P y T_L . Finalmente la multiplicación de Z , S y C es la aceleración máxima en la estructura.

Ilustración 3: Aceleración máxima en la estructura



Fuente: Comentarios a la Norma E.030 [15]

Otro aspecto importante que toma en cuenta la Norma E.030 es la importancia de la edificación, estableciendo 3 categorías: esenciales, importantes y comunes. En la primera se encuentran los establecimientos de salud, edificios que puedan usarse de amparo luego de un desastre, puertos, etc. En la segunda categoría están las edificaciones que agrupan una gran cantidad de personas, como por ejemplo, estadios, centros comerciales. En la última categoría se encuentran viviendas, restaurantes, oficinas [14]. Dependiendo del proyecto a realizar se tiene un factor de importancia (U) que amplifica la aceleración para la categoría de esencial e importante en relación con la edificación común, con el fin de brindarles mayor resistencia y rigidez [15, p. 21].

Además la Norma E.030 menciona los siguientes sistemas estructurales:

a) Sistema Estructural de Concreto Armado

Se basa principalmente en el porcentaje que absorben los elementos estructurales en relación a la fuerza cortante en la base. Se dividen en cuatro sistemas: pórticos, cuando las columnas soportan por lo menos el 80% de la fuerza cortante en la base; muros estructurales, donde las placas soportan por lo menos el 70% de la fuerza cortante en la base; dual, este sistema está formado por columnas y placas, donde estas últimas toman entre el 20 y 70% de la fuerza cortante en la base; finalmente se encuentra el sistema de muros de ductilidad limitada.

b) Sistema Estructural de Albañilería Armada o Confinada

A cada sistema estructural se le brinda un coeficiente básico de reducción (R_o) que es el mismo cuando es una estructura regular, pero varía con presencia de irregularidades. La norma E.030 presenta algunas irregularidades tanto en altura como en planta. En la primera se encuentran las irregularidades de rigidez, resistencia, extrema rigidez, extrema resistencia, masa o peso, geometría vertical, discontinuidad en los sistemas resistentes. En la segunda se presenta irregularidad torsional, torsional extrema, esquinas entrantes, discontinuidad del diafragma y sistemas no paralelos [14, pp. 17-18].

Finalmente se debe determinar el peso de la estructura, que se calcula como el 100% de la carga muerta y un cierto porcentaje de la carga viva, eso va a depender de la categoría de la edificación, siendo para nuestro proyecto el 50% ,ya que los colegios se encuentran en la categoría A. Asimismo se debe especificar que en caso de azoteas o techos se considera el 25% de carga viva [14, p. 20].

Uno de los análisis que indica la Norma E.030 es el de fuerzas estáticas equivalentes, donde la cortante basal se encuentra en función de los factores de zona, suelo, uso, amplificación sísmica, coeficiente de reducción de fuerza sísmica y el peso de la edificación. En este análisis se asume la presencia de un solo modo fundamental de vibración con el 100% de la masa efectiva del edificio. A continuación se muestra la siguiente expresión:

$$V = \left(\frac{Z * U * S * C}{R} \right) * P$$

La norma E.030 también menciona el análisis dinámico modal espectral en el cual se utilizan una cierta cantidad de modos de vibración y la suma de todas sus masas efectivas deben ser por lo menos el 90% de la masa total. Es recomendable que los tres primeros modos de vibración sean los predominantes [15, p. 39].

Para el análisis se debe calcular un espectro de pseudo aceleraciones para cada dirección en estudio. Por ejemplo cuando existe la presencia de dos sistemas estructurales, en la dirección X es muros estructurales con un coeficiente básico de reducción igual a 6 y en la dirección Y es albañilería confinada con un R_o igual a 3. En este caso existirá un espectro de pseudo aceleración tanto en la dirección X e Y. El espectro se determina con la siguiente expresión:

$$S_a = \frac{Z * U * S * C}{R} * g$$

Principios de la Norma Albañilería E.070

El sistema utiliza ladrillos de arcilla, y como elementos de confinamiento las columnas y vigas soleras. El procedimiento consta primero en el levantamiento del muro de ladrillo para luego realizar el vaciado del concreto en columnas, y finalmente la construcción de la losa en conjunto con las vigas. La Norma E.070 Albañilería menciona que este sistema debe cumplir las siguientes especificaciones:

- ✓ Puede utilizar dos tipos de conexiones: dentada, el ladrillo saliente no debe sobrepasar de 5 cm; y al ras, empleando mechas, chicotes o refuerzo horizontal continuo.
- ✓ En caso de utilizar la conexión al ras con refuerzo horizontal continuo, este acero debe anclar a la columna de confinamiento unos 12.5 cm con gancho vertical a 90° de 10 cm.

- ✓ La resistencia a la compresión del concreto en elementos de confinamiento debe ser mayor o igual a 175 kg/cm².
- ✓ Los muros portantes (transmiten cargas horizontales y verticales desde los niveles superiores a la cimentación) deben tener continuidad vertical.
- ✓ Los tabiques deben presentar sus respectivas juntas en la unión tabique – elemento de confinamiento.
- ✓ El muro portante debe tener un espesor mínimo efectivo dependiendo de la zona sísmica.

Tabla 3: Espesor mínimo efectivo del muro portante

Zona Sísmica	Espesor Mínimo Efectivo del Muro Portante
2 y 3	$t \geq \frac{h}{20}$
1	$t \geq \frac{h}{25}$

Fuente: Norma E.070 Albañilería

- ✓ El esfuerzo axial máximo del muro portante es producido por la carga muerta y el 100% de la carga viva y debe ser menor que:

$$\sigma_m = \frac{P_m}{L * t} \leq 0.2 * f'c * \left[1 - \left(\frac{h}{35t} \right)^2 \right] \leq 0.15 f'c$$

- ✓ Existe una densidad mínima de muros portantes a reforzar y se calcula con algunos parámetros sísmicos como se muestra la siguiente expresión:

$$\frac{\text{Area de corte de los muros reforzados}}{\text{Area en planta}} = \frac{\sum L * t}{A_p} \geq \frac{Z * U * S * N}{56}$$

- ✓ Los muros no se deben fisurar en presencia de un sismo moderado y se verifica con la siguiente expresión:

$$V_e \leq 0.55 * V_m$$

Donde:

Ve: Fuerza cortante del muro producida por el sismo moderado

V_m : Fuerza cortante asociada al agrietamiento diagonal

La resistencia al agrietamiento diagonal se calcula con la siguiente expresión:

$$V_m = 0.5 * v'_m * \alpha * t * L + 0.23 * P_g$$

Donde:

v'_m : Resistencia a corte de la albañilería

P_g : Carga gravitacional con sobrecarga reducida

α : Factor de reducción de resistencia al corte por efectos de esbeltez

Comportamiento uniaxial para el concreto y acero de refuerzo

Calcina [6, p. 14] menciona lo siguiente “Conocer el comportamiento de una estructura de concreto armado bajo carga requiere el conocimiento detallado de las propiedades de los elementos”. Es por ello que se hace un estudio de la curva esfuerzo vs deformación tanto para el concreto sin confinar, concreto confinado y acero de refuerzo. Esta curva presenta en las ordenadas el esfuerzo (fuerza aplicada en una unidad de área del material), y en las abscisas la deformación (cambio que sufre el material al estar sometido a dicho esfuerzo).

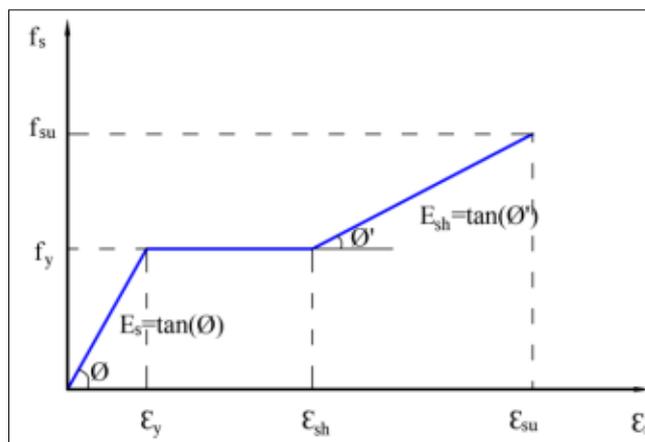
Modelo de esfuerzo deformación para el acero de refuerzo

El modelo Trilineal de esfuerzo deformación para el acero de refuerzo nos indica el comportamiento del material más allá del rango lineal.

- **Modelo Trilineal**

Este modelo consta de 3 zonas: lineal elástica, fluencia y endurecimiento por deformación [1, p. 33].

Ilustración 4: Curva esfuerzo - deformación modelo Trilineal

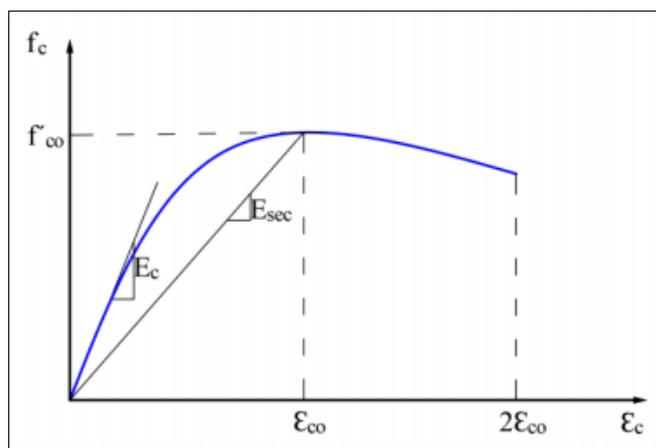


Fuente: Análisis Estático no Lineal y Evaluación del Desempeño Sísmico de un Edificio de 8 Niveles Diseñado con la Norma E.030 [1]

Modelo de esfuerzo deformación para el concreto no confinado

En la presente tesis se va a utilizar el modelo de Mander donde en el esfuerzo máximo alcanza una deformación $\varepsilon_o = 0.002$ y después se observa una caída hasta la deformación $2\varepsilon_o = 0.004$, más allá de esta deformación existe una pérdida total de capacidad debido a que ya no existe recubrimiento [16].

Ilustración 5: Curva esfuerzo - deformación del concreto no confinado - modelo de Mander

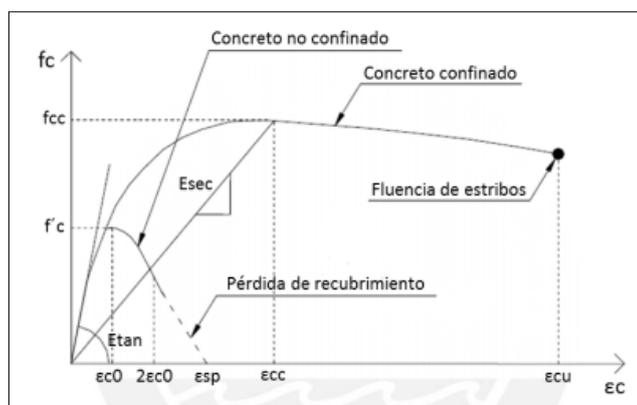


Fuente: Análisis Estático no Lineal y Evaluación del Desempeño Sísmico de un Edificio de 8 Niveles Diseñado con la Norma E.030 [1]

Modelo de esfuerzo deformación para el concreto confinado

El modelo de Mander nos indica que la presencia de estribos incrementa la deformación unitaria y el esfuerzo del concreto, y sirve tanto para elementos rectangulares como circulares [1, p. 37].

Ilustración 6: Curva esfuerzo - deformación del concreto confinado - modelo de Mander

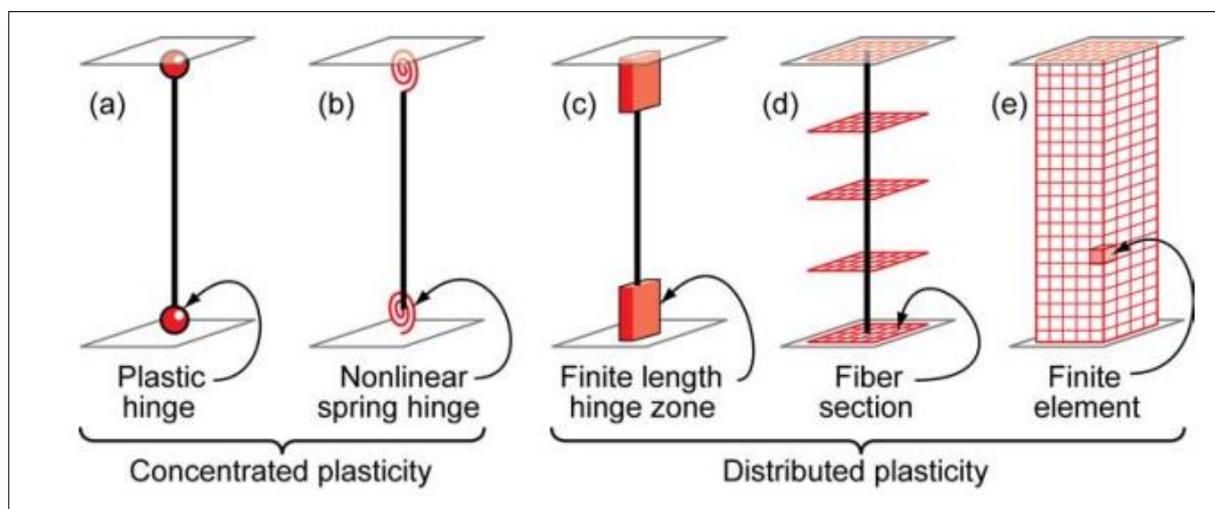


Fuente: Estudio de Relaciones Momento – Curvatura en Secciones de Concreto Armado y Concreto Preesforzado Sometidas a Flexión [16].

Tipos de plasticidad para concreto armado y albañilería

Los modelos de plasticidad concentrada y plasticidad distribuida nos permiten simular la no linealidad de los elementos de concreto armado. El primer modelo concentra todos los efectos de no linealidad en resortes o articulaciones de longitud cero, pero tiene un inconveniente en la determinación de los parámetros de calibración, ya que requiere resultados experimentales. En el segundo modelo los miembros o nudos son discretizados en un número de elementos finitos [2, pp. 47-48].

Ilustración 7: Modelos de plasticidad concentrada y plasticidad distribuida



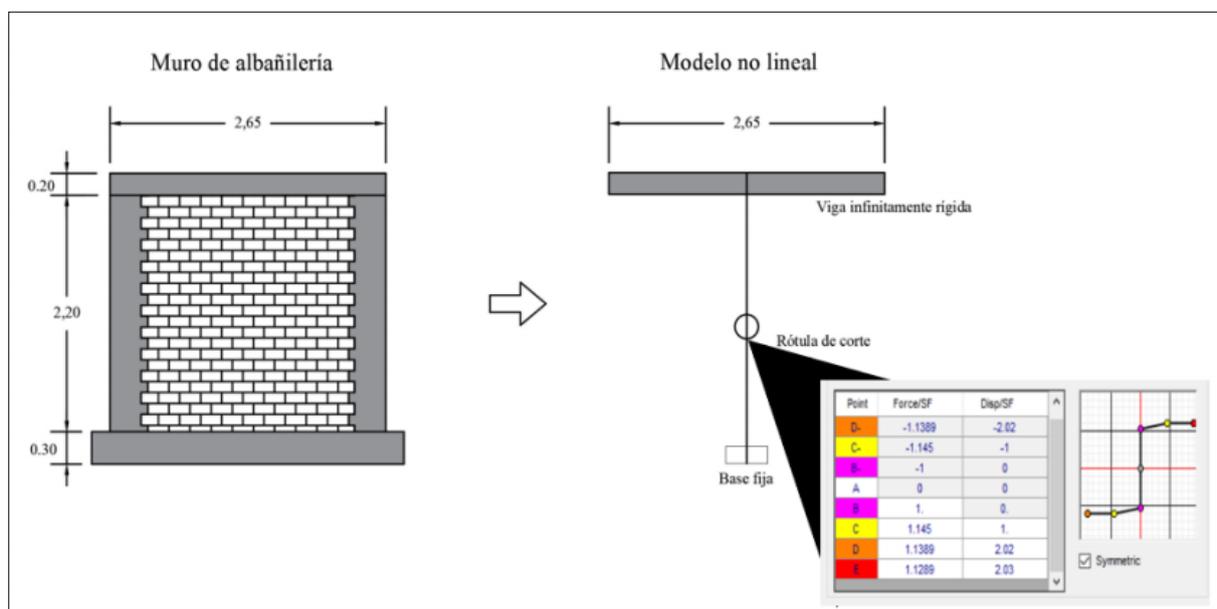
Fuente: Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design [17]

En la Ilustración 7 se muestra cinco tipos de modelos que pueden representar la no linealidad de los elementos vigas y columnas, estos presentan una plasticidad que puede ubicarse en secciones transversales o a lo largo de toda la longitud del elemento. El primer modelo es de una rótula plástica, concentrando su no linealidad en los extremos del elemento; el segundo modelo es una rótula de resorte no lineal con propiedades histeréticas; el tercer modelo es de una rótula de longitud finita, perteneciente al grupo de plasticidad distribuida con rótulas en los extremos de los miembros; el cuarto modelo es de sección fibra distribuyendo la no linealidad en secciones transversales y a lo largo de toda la longitud del elemento, consta principalmente en una división de pequeños trazos en los cuales se puede observar con mayor facilidad los esfuerzos de cada uno de ellos; finalmente el último modelo es de elementos finitos en el cual discretizan en secciones transversales y a lo largo de toda la longitud de manera continua. En

la presente tesis se va a utilizar un modelo de plasticidad distribuida sección fibra en columnas y vigas [17, pp. 4-5].

Con el fin de simular las propiedades no lineales del muro de albañilería se investigó un modelo con elemento frame de concreto, cabe recalcar que en este modelo se debe utilizar las propiedades y dimensiones del muro de albañilería en estudio. Luego al elemento frame se le asigna una rótula de corte a la mitad de la altura del elemento en su dirección lateral de deformaciones con las propiedades de la curva de capacidad del muro. Sobre el frame se le agrega una viga con rigidez infinita, tal como se aprecia en la siguiente ilustración [18].

Ilustración 8: Modelo no lineal del muro de albañilería



Fuente: Análisis Dinámico Incremental de un Hospital de 60 Años de Antigüedad con Muros de Albañilería Artesanal [18].

Análisis estático no lineal “pushover”

Procedimiento del análisis

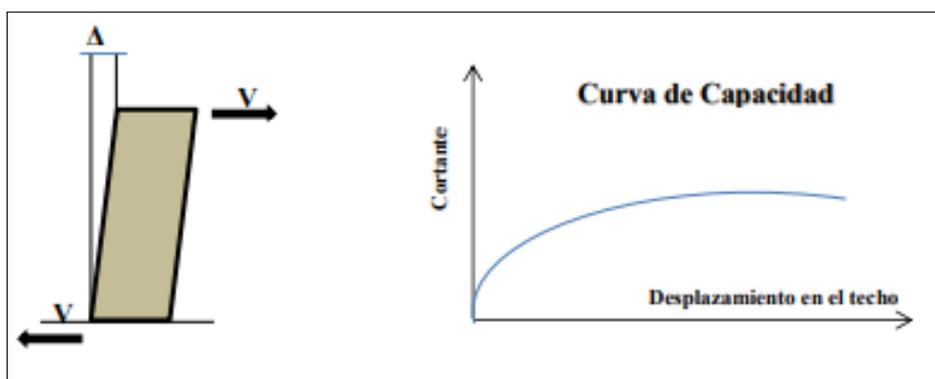
Este análisis determina la capacidad de la estructura, ya que se basa en asignar fuerzas laterales de manera incremental monótonica hasta alcanzar el máximo desplazamiento de la estructura. A cada elemento se le asigna rótulas plásticas en función del tipo de falla, es por ello que conforme se incrementa la carga lateral se va apreciando la formación de rótulas en cada elemento, los cuales pueden conducir al colapso. En la presente tesis los patrones de cargas laterales se van a

distribuir de manera proporcional a la forma del modo fundamental de vibración en la dirección de análisis [19].

El Pushover comienza con la definición de un primer caso no lineal relacionado a la carga gravitacional, luego el segundo caso ya se encuentra relacionado con el patrón de cargas laterales, finalmente se obtiene la curva de capacidad (cortante en la base versus desplazamiento en el techo) [19, p. 57].

Duarte, Martínez y Santamaría [20] mencionan “La curva de capacidad se construye generalmente para mostrar la respuesta del primer modo de vibración de la estructura, basándose en la hipótesis que el modo fundamental de vibración se corresponda con la respuesta predominante”.

Ilustración 9: Curva de capacidad



Fuente: Evaluación del Desempeño Sismorresistente de un Edificio Destinado a Vivienda en la Ciudad de Lima Aplicando el Análisis Estático no Lineal Pushover [21].

La finalidad de determinar la curva de capacidad es saber cuál es su disponibilidad a la fluencia y la capacidad máxima de la estructura. Esta capacidad depende fundamentalmente de sus componentes, es decir, del acero, concreto y albañilería [21].

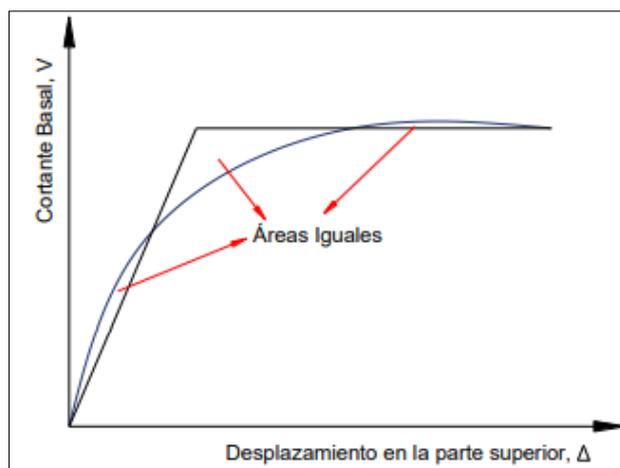
Representación bilineal de la curva de capacidad

Cuando se aprecia la primera rótula plástica significa el comienzo del comportamiento no lineal pero no hay un cambio en la rigidez y resistencia, es decir no existe algún cambio brusco en la curva de capacidad de la estructura. Es por ello que se debe hallar un punto de fluencia, el cual debe representar un cambio en el comportamiento y curva de capacidad de la estructura [10, p. 41].

A continuación, se mencionan los diferentes criterios para determinar el punto de fluencia:

- ✓ **Criterio de la rigidez tangente horizontal:** Consta en trazar una tangente a la curva de capacidad y luego se traza una línea horizontal en la cortante basal V_u , el punto de fluencia es la intersección de estas dos líneas [10, p. 41].
- ✓ **Criterio de las rigideces tangentes:** Este criterio consta en trazar dos tangentes a la curva de capacidad de la estructura, la primera en la zona elástica y la segunda en la zona plástica. Finalmente, el punto de fluencia es la intersección de ambas tangentes [10, p. 42].
- ✓ **Criterio de las áreas iguales:** Este criterio consta principalmente que el área exterior sea igual al área interior, y cuando esto se logre, la intersección de ambas líneas es el punto de fluencia [22, p. 24].

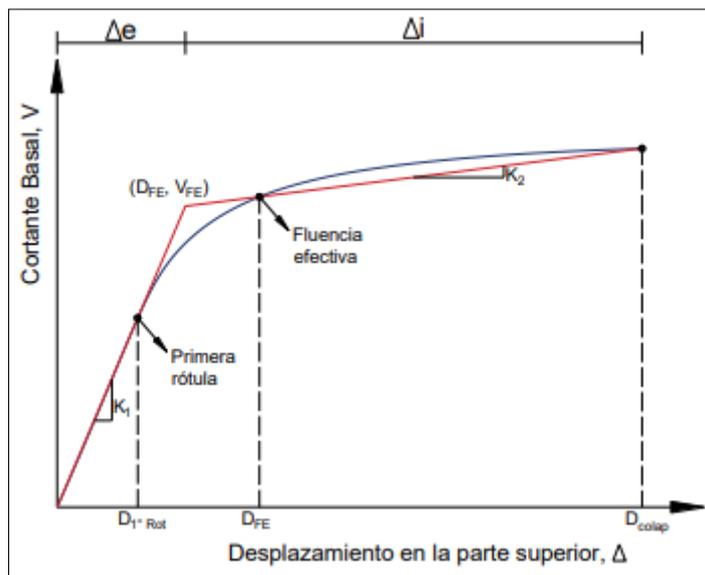
Ilustración 10: Criterio de áreas iguales



Fuente: Desempeño Sísmico del Módulo "A" de la I.E. San Ramón en la Ciudad de Cajamarca – 2017 [10].

Teniendo el punto de fluencia nos damos cuenta del rango de desplazamientos elásticos e inelásticos de la estructura, como se aprecia en la Ilustración 11.

Ilustración 11: Zona de desplazamientos elásticos e inelásticos de la estructura



Fuente: Desempeño Sísmico del Módulo "A" de la I.E. San Ramón en la Ciudad de Cajamarca – 2017 [10].

Método de los coeficientes para determinar el punto de desempeño

El punto de desempeño caracteriza el estado de daño de la estructura sometida a un evento sísmico y esto se compara con los objetivos de desempeño deseado. En la presente tesis se determinará utilizando el método de los coeficientes propuesto por el FEMA 440 y el ASCE/SEI 41-13.

El método modifica la respuesta elástica por medio de una serie de coeficientes para determinar el desplazamiento objetivo. El procedimiento es el siguiente:

- Determinar la curva de capacidad utilizando el análisis estático no lineal Pushover.
- Estimar la cortante basal de fluencia V_y , teniendo en cuenta que el área exterior e interior deben ser iguales, este es un proceso iterativo.
- Definir una línea recta con origen 0 y un punto sobre la curva de capacidad con una cortante $0.6V_y$
- Calcular la rigidez lateral efectiva de la estructura con la siguiente expresión:

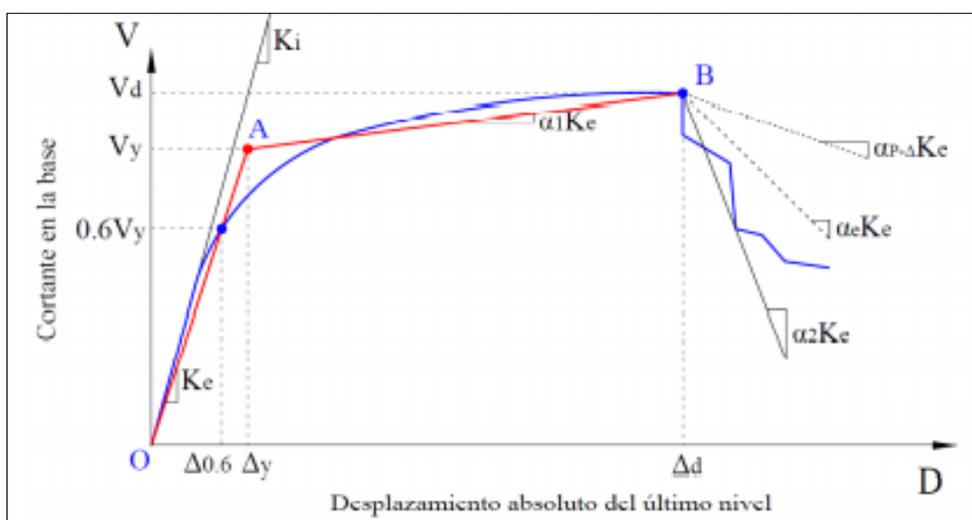
$$K_e = \frac{0.6V_y}{D_{0.6}}$$

- Determinar el desplazamiento de fluencia con la siguiente expresión:

$$D_y = \frac{V_y}{K_e}$$

- El primer segmento consta de una recta con origen 0 hasta el punto de fluencia.
- El segundo segmento consta de la unión del punto B (V_d , Δ_d) y el punto de fluencia A (V_y , Δ_y).
- El punto B se ubica sobre la curva de capacidad real con un desplazamiento objetivo y cortante máximo en la base.
- La intersección de ambos segmentos debe tener áreas iguales por encima y por debajo de la curva de capacidad.
- El último segmento está determinado por el punto (V_d , Δ_d) y el punto donde la cortante basal se degrade a un 60% de la resistencia de fluencia efectiva.

Ilustración 12: Representación bilineal de la curva de capacidad



Fuente: Análisis Estático No Lineal y Evaluación del Desempeño Sísmico de un Edificio de 8 Niveles Diseñado con la Norma E.030 [1].

El desplazamiento objetivo se calcula con la siguiente expresión:

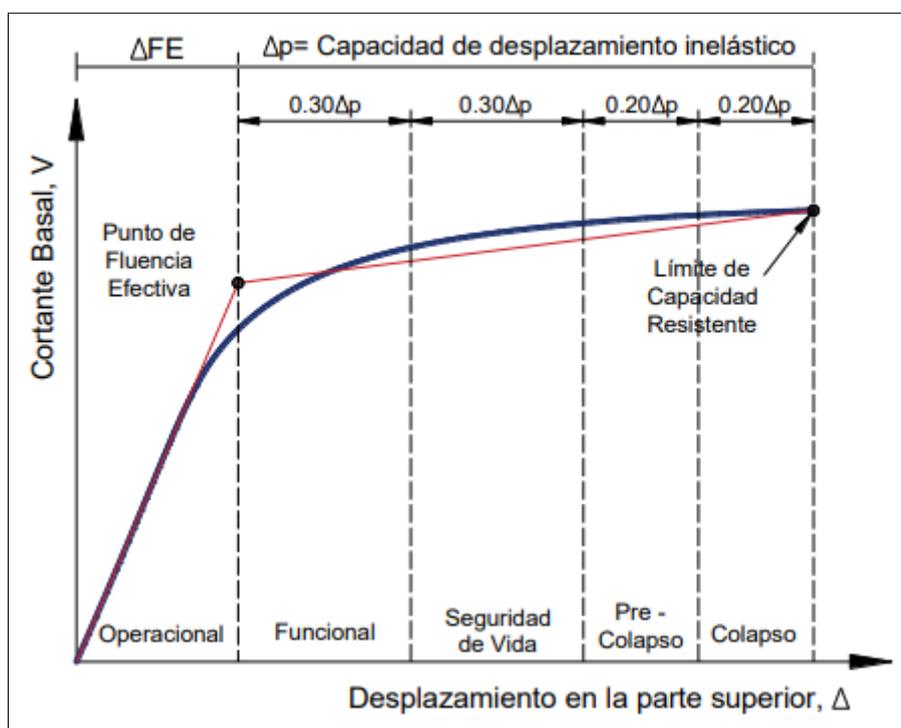
$$\delta_t = C_o * C_1 * C_2 * S_a * \frac{T e^2}{4\pi^2} * g$$

Verificación del desempeño según el SEAOC

El documento Visión 2000 del SEAOC menciona varios niveles de desempeño en función del daño que pueda presentar una edificación a causa de un movimiento sísmico, tanto para los elementos estructurales como no estructurales. Los niveles de desempeño son los que presentan por sectores a la curva de capacidad, para ello primero se debe definir el desplazamiento de fluencia efectiva (Δ_{FE}) y la capacidad de desplazamiento inelástico (Δ_p) [10]. Cada nivel de desempeño se encuentra representado por un cierto porcentaje del desplazamiento inelástico, como se muestra en la siguiente Ilustración 13.

En la presente tesis por ser una edificación esencial expuesta a un sismo máximo se espera que la estructura se encuentre en un nivel de desempeño de resguardo de vida.

Ilustración 13: Sectorización de la curva de capacidad según el SEAOC



Fuente: Desempeño Sísmico del Módulo "A" de la I.E. San Ramón en la Ciudad de Cajamarca - 2017 [10].

Análisis dinámico no lineal tiempo historia

Se basa en determinar la respuesta dinámica de una estructura en distintos tiempos y para ello se utilizará como mínimo 3 registros de acelerogramas reales, los cuales deben escalarse al espectro elástico. La finalidad de utilizar el análisis no lineal tiempo historia es tener una idea más clara del comportamiento de la estructura, ya que incorpora las propiedades no lineales de los materiales.

Materiales y métodos

Tipo y nivel de investigación

Esta investigación es explicativa, ya que desarrolla todo el proceso que conlleva el análisis no lineal en la evaluación de estructuras y para ello se utiliza normas nacionales como internacionales. Además, se recolecta toda la información acerca del cálculo, utilización del software e imágenes que nos ayuden a entender mejor el estudio del tema, buscando siempre que el lector entienda con claridad el tema a tratar y sirva como guía para próximas investigaciones.

Diseño de investigación

Esta investigación es de diseño no experimental, debido a que no existe una manipulación de las variables, se observa la edificación tal como está para luego analizarla.

Población, muestra, muestreo

Población: Todos los colegios que tengan la misma configuración estructural

Muestra: I.E. 10202 “Virgen de la Paz” – Pacora.

Técnica de muestreo: No probabilística por conveniencia

Criterios de selección

Muchas de las estructuras solo son diseñadas para soportar cargas gravitacionales y no se tiene en consideración las fuerzas que generan los sismos. Debido a ello se analizó la estructura utilizando el análisis no lineal, con la finalidad de tener una idea más clara del comportamiento de la estructura frente a un evento sísmico. Se decidió estudiar este tipo de edificación, ya que debe proporcionar una seguridad plena a los estudiantes y personas que laboren en este centro educativo y tener suficiente tiempo de evacuación en caso de presentarse un sismo máximo.

La institución educativa consta de 5 módulos, pero por similitud solo se consideró analizar dos módulos con diferente configuración estructural. Se utilizó el software Etabs para el modelamiento y análisis de las estructuras, debido a que es una herramienta muy sofisticada y con alta capacidad de poder analítico lineal y no lineal.

Operacionalización de variables

Variable independiente:

- Institución Educativa 10202 “Virgen de la Paz”

Variable dependiente:

- Desempeño Estructural
- Análisis No Lineal

Tabla 4: Operacionalización de variables

VARIABLE	DIMENSION	INDICADOR
Var. Independiente: Institución Educativa 10202 “Virgen de la Paz”	Capacidad	Derivas
		Cortante Basal
		Períodos
Var. Dependiente: Desempeño Estructural	Nivel de Daño Estructural	Niveles de desempeño en elementos estructurales y no estructurales
	Nivel de Amenaza Sísmica	Frecuente, ocasional, sismo de diseño, sismo máximo
	Punto de Desempeño	Método de Coeficientes
Análisis No Lineal	Análisis Estático No Lineal	Análisis Pushover
	Análisis Dinámico No Lineal	Análisis Tiempo Historia

Fuente propia

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Análisis de documentos: libros, tesis, revisas, ensayos de materiales de otras fuentes confiables, artículos de investigación, normativas.

Recopilación de la información del proyecto: expediente técnico.

Observación: criterios estructurales.

Programa: ETABS

Procedimientos

Se comenzó con el estudio del expediente técnico de la Institución Educativa, donde se analizó la memoria descriptiva, resumen ejecutivo, diseños, y los planos. El modelamiento y análisis lineal y no lineal se realizó con el software Etabs.

Ya teniendo definido los dos módulos a estudiar, se identificó los materiales y secciones de cada elemento estructural, para luego realizar el metrado de cargas, las cuales se aplicarán en la losa aligerada y vigas.

Primero se desarrolló el análisis lineal estático, donde se determinó los diversos parámetros sísmicos presentes en la Norma E.030, con ello se obtuvo la cortante basal para cada dirección. Luego se realiza el análisis dinámico modal espectral, donde se construye el espectro de pseudo aceleración y con ello verificar distorsiones, irregularidades y corrección de la cortante. Además, se hizo uso de la Norma E.070 para la verificación de densidad mínima, esfuerzos axiales y control de figuración en los muros portantes de albañilería.

El análisis estático no lineal consta de la siguiente secuencia:

- ✓ Se utilizó el modelo de Mander para la curva esfuerzo deformación del concreto confinado y el modelo trilineal para el acero de refuerzo.
- ✓ Asignación de rótulas plásticas en vigas, columnas, muros de concreto armado y albañilería.
- ✓ Creación de la carga gravitacional (100% Carga Muerta y 50% de carga viva).
- ✓ Creación de la carga monotónica no lineal.
- ✓ Obtener la curva de capacidad para cada dirección en estudio y determinar el punto de desempeño de la estructura por el método de los coeficientes.
- ✓ Evaluar el desempeño estructural de acuerdo a Visión 2000, y va a depender de la sectorización de la curva de capacidad.

El análisis dinámico no lineal Tiempo Historia consiste en aplicar a la estructura una serie de registros sísmicos y ver cuál es su comportamiento. El tratamiento de los registros sísmicos son los siguientes:

- ✓ Corrección por línea base y filtrado utilizando el software SeismoSignal.
- ✓ Calcular el espectro elástico

- ✓ Las señales sísmicas deben ser escaladas y compatibles con el espectro elástico y para ello se utilizó el software SeismoMatch.
- ✓ Finalmente se realiza un acortamiento de por Arias

Con ello las señales ya están listas para poder aplicarle a la estructura y ver cuál es su comportamiento.

Plan de procesamiento y análisis de datos

En la presente investigación se seguirá los siguientes pasos:

1. Recopilación de información.
2. Revisión de normas alineados a la investigación. Norma E.020, E.030, E.070, FEMA, ASCE/SEI 41-13.
3. Comprender el procedimiento a realizar.
4. Analizar la información obtenida del proyecto.
5. Digitalización de planos.
6. Modelamiento de la estructura
7. Análisis estático no lineal “Pushover”, obtener la curva de capacidad, observar la formación de las rotulas plásticas.
8. Estimar el punto de desempeño por el método de los coeficientes propuesto por FEMA 440 y el ASCE/SEI 41-13.
9. Aplicar el análisis dinámico no lineal al proyecto de investigación.
10. Evaluación del desempeño sísmico y buscar la mejor alternativa de reforzamiento si fuera necesario.
11. Realizar una comparación del análisis no lineal dinámico con el análisis no lineal estático Pushover.

Matriz de consistencia

TITULO: EVALUACION DEL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL UTILIZANDO EL ANÁLISIS NO LINEAL DE LA I.E. 10202 “VIRGEN DE LA PAZ” – PACORA

FORMULACION DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES Y DIMENSION	INDICADORES	METODOLOGÍA TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
¿Será necesario aplicar una alternativa de reforzamiento, si evaluamos el desempeño de la I.E. 10202 “Virgen de la Paz” – Pacora, utilizando el análisis no lineal?	<p>Objetivo General: Evaluación del desempeño estructural utilizando el análisis no lineal con fines de reforzamiento de la I.E. 10202 “Virgen de la Paz” – Pacora.</p> <p>Objetivos Específicos: -Aplicar el análisis estático no-lineal “Pushover” y el análisis dinámico no lineal a la estructura. -Obtener la curva de capacidad para poder determinar el punto de desempeño de la estructura. -Evaluar el nivel de desempeño sísmico de la edificación utilizando ambos análisis no lineales. -Elegir la mejor alternativa de reforzamiento, después de analizar los resultados obtenidos del análisis. -Realizar una comparación del análisis no lineal dinámico con el análisis no lineal estático Pushover.</p>	La aplicación del análisis no lineal nos permitirá saber el desempeño estructural de la I.E. 10202 “Virgen de la Paz” - Pacora.	<p>Independiente -Institución Educativa 10202 “Virgen de la paz” -Capacidad</p> <p>Dependiente -Desempeño Estructural -Nivel de daño estructural -Nivel de amenaza sísmica -Punto de desempeño</p> <p>-Análisis No Lineal -Análisis estático no lineal -Análisis dinámico no lineal</p>	<p>-Derivas -Cortante basal -Periodos</p> <p>-Niveles de desempeño en elementos estructurales y no estructurales -frecuente, ocasional, sismo de diseño, sismo máximo -Método de coeficientes</p> <p>-Análisis Pushover</p> <p>-Análisis Tiempo Historia</p>	La presente investigación aplica una serie de documentos (libros, tesis, revistas, artículos de investigación y normativas), además de la recopilación de la información del proyecto (memoria descriptiva, memoria de cálculo, planos). Con ello se analizará la estructura utilizando el análisis no lineal y se evaluará su desempeño.

Consideraciones éticas

En la tesis se tomará en cuenta lo que se especifica en el expediente técnico, sin realizar alguna modificación de ello. Por ningún motivo se tomará información de otras fuentes sin ser citadas. Los datos mostrados en los resultados son verídicos, no son alterados, ni copiados. Ciertos datos experimentales sobre los ensayos de los materiales, serán tomadas de fuentes confiables.

Resultados y discusión

La Institución educativa consta de cinco módulos destinados para aulas, salas de profesores, comedores, bibliotecas y servicios higiénicos. En la presente tesis solo se analizará dos módulos, debido a que algunos de ellos son similares.

Resultados

Módulo 01 de la Institución Educativa

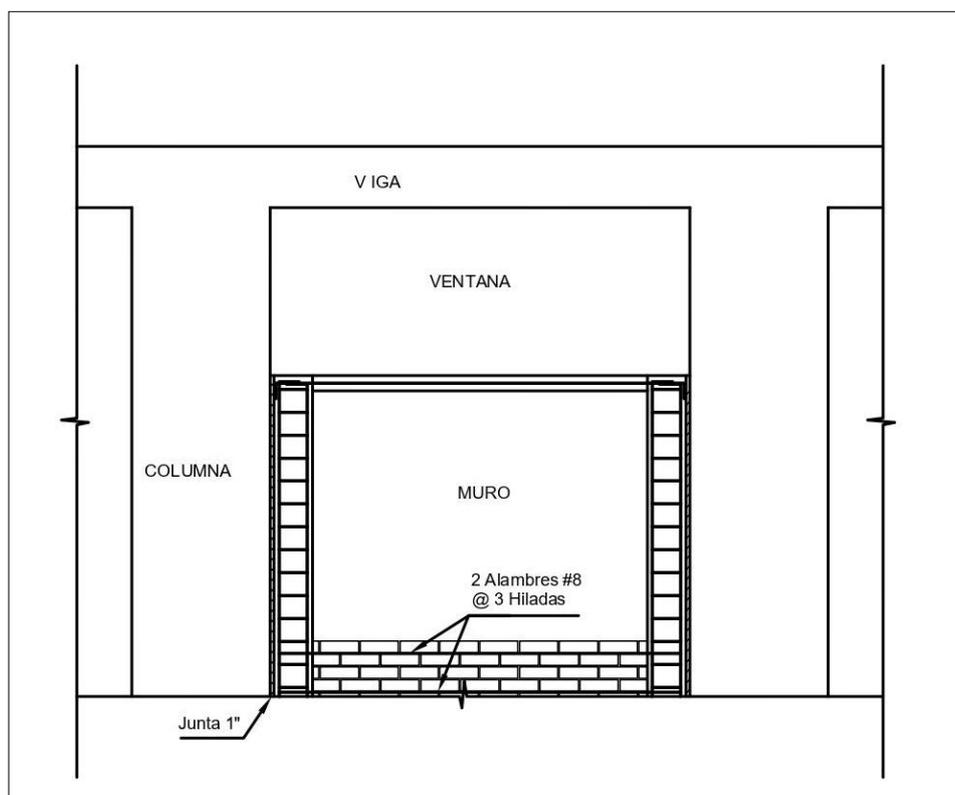
El colegio en estudio se ubica en el distrito de Pacora, provincia de Lambayeque, departamento de Lambayeque. El primer módulo consta de dos pisos destinado para aulas con un área techada de 292 m². La altura del primer piso es de 3.35 m y el segundo piso es de 3.20 m. En la dirección X el sistema estructural es muros de concreto armado y en la dirección Y es de albañilería confinada, teniendo muros portantes con un espesor de 0.25 m. Además, tiene una losa aligerada armada en la dirección X con un espesor de 0.20 m. Con el propósito de ofrecer un entorno atractivo e iluminado, tanto en la fachada interior como exterior del primer piso se tiene ventanas de 1.00 m de altura y un alfeizar de 1.95 m, en el segundo piso se tiene ventanas de 1.00 m de altura y un alfeizar de 1.80 m. Este módulo tiene parapeto de 1.10 m de altura con un espesor de tabique de 0.15 m, el cual presenta elementos de confinamiento (columnetas y vigas soleras). En la ilustración 15 se observa que la tabiquería se encuentra aislada de los elementos estructurales, lo cual no habría problema con los efectos de columna corta.

Ilustración 14: Fachada interior de la Institución Educativa



Fuente: Elaboración propia

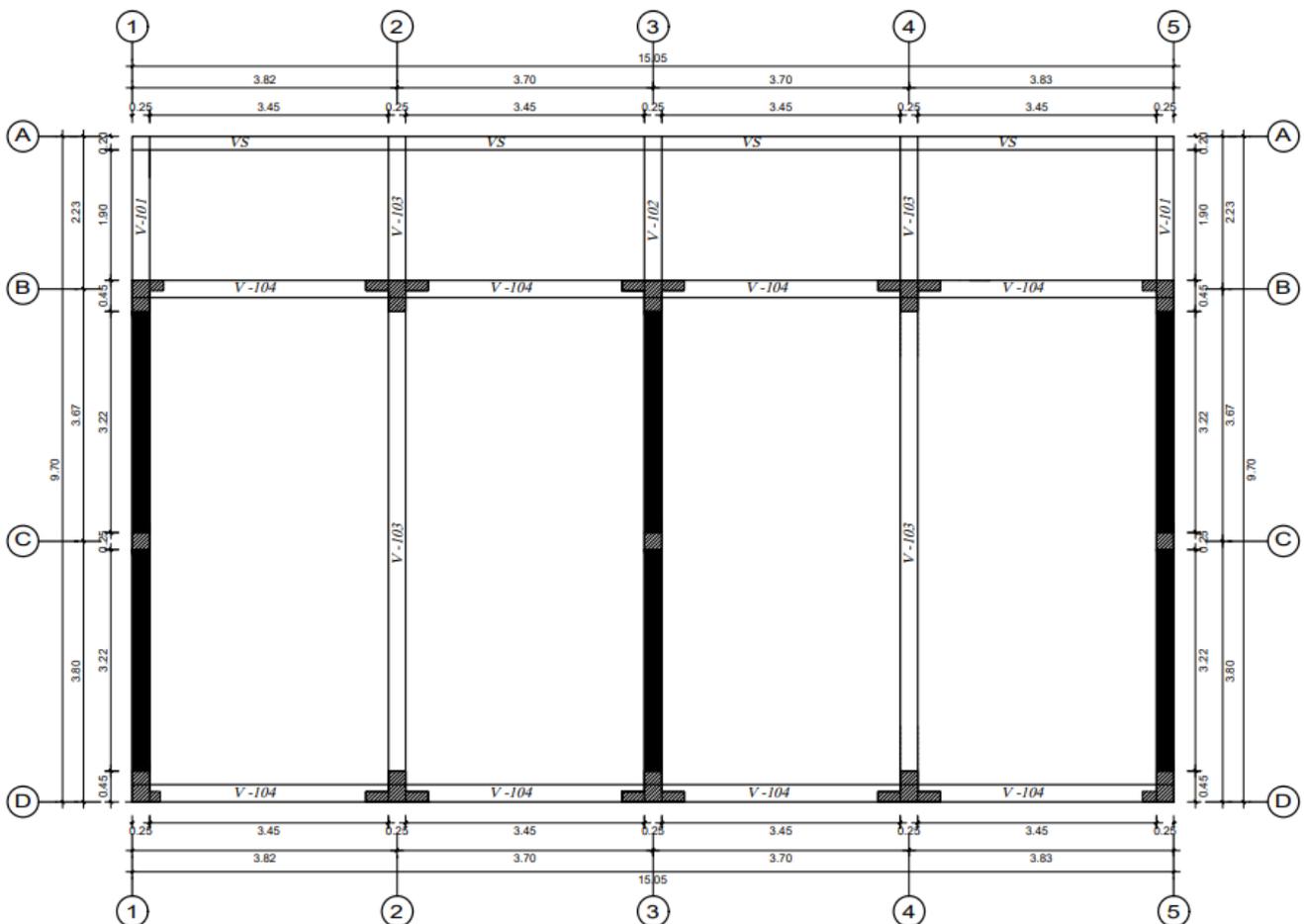
Ilustración 15: Aislamiento tabique - elemento estructural



Fuente: Elaboración propia

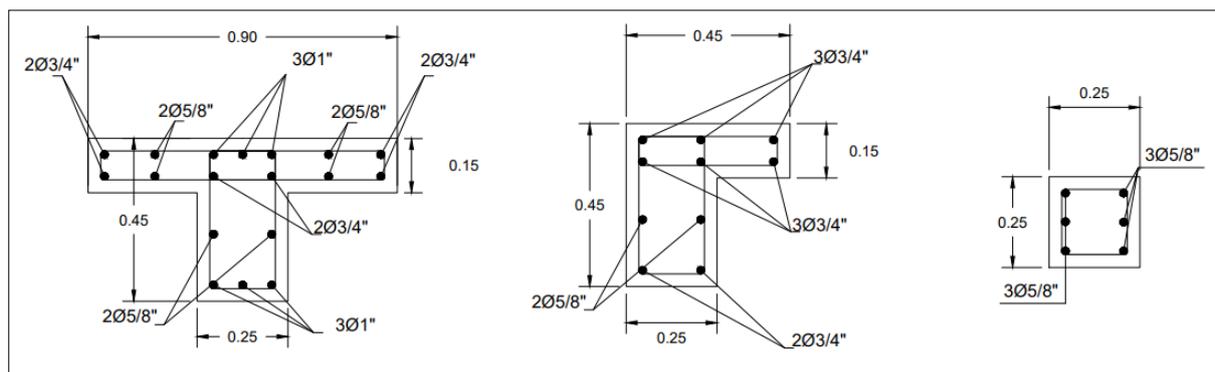
En el eje 1, 3 y 5 se observa los muros portantes de albañilería, que sirven para separar las aulas y estos presentan elementos de confinamiento (columnas y vigas soleras). Las vigas soleras tienen una dimensión de 0.25 m x 0.30 m, y presentan dos características importantes: trabajan a tracción y distribuyen uniformemente las cargas verticales. Las columnas de confinamiento presentan formas de L y rectangulares, tienen la función principal de aumentar la capacidad de deformación o flexión del muro ante la fuerza sísmica. Además, en la dirección Y presenta vigas peraltadas de 0.25 m x 0.75 m, debido a que soporta el peso de la losa y presenta una luz considerable. En la dirección X se observa la presencia de muros de concreto armado y vigas (0.25 m x 0.40 m).

Ilustración 16: Plano estructural del módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 17: Columnas y muros de concreto armado del módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de la estructura se va a tener en cuenta las características y propiedades mecánicas de los materiales tal como se menciona en el expediente técnico de la Institución Educativa.

Tabla 5: Propiedades mecánicas de los materiales

Material	Propiedades
Concreto Armado	<p>Resistencia a la Compresión $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$</p> <p>Peso Unitario 2400 kg/cm^3</p> <p>Módulo de Elasticidad $E = 15000 \sqrt{f'c} = 217370.65 \text{ kg/cm}^2$</p> <p>Módulo de Poisson $\mu = 0.15$</p>
Albañilería	<p>Resistencia a la Compresión Axial $f'm = 65 \text{ kg/cm}^2$</p> <p>Resistencia al Corte de Ensayo en Muretes $v_m = 8.1 \text{ kg/cm}^2$</p> <p>Peso Unitario de Unidades de Albañilería Cocida Sólida 1800 kg/cm^3</p> <p>Módulo de Elasticidad $E_m = 500 * f'm = 32500 \text{ kg/cm}^2$</p> <p>Módulo de Poisson $\mu = 0.25$</p>
Acero de Refuerzo	<p>Esfuerzo de Fluencia $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$</p> <p>Peso unitario 7850 kg/m^3</p> <p>Módulo de Elasticidad 2000000 kg/cm^2</p>

Fuente: Elaboración propia

Para el metrado de cargas se ha tenido en consideración a la Norma E.020, donde se especifica los pesos unitarios de los materiales y la carga viva mínima repartida según la ocupación de la estructura.

La carga de la tabiquería en las vigas adquiere un valor de:

$$\text{Parapeto: } w = 0.15 * 1.10 * 1350 = 222.75 \text{ kg/m}$$

$$\text{Alféizar: } w = 0.15 * 1.80 * 1350 = 364.5 \text{ kg/m}$$

La Norma E.020 considera una sobrecarga de 250 kg/m² en aulas, 400 kg/m² en corredores y 100 kg/m² para techos.

Tabla 6: Carga muerta módulo 01

Carga Muerta	
Losa Aligerada e = 0.20 m	300 kg/m ²
Acabados	100 kg/m ²
Parapeto	222.75 kg/m
Alféizar	364.5 kg/m

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7: Carga viva módulo 01

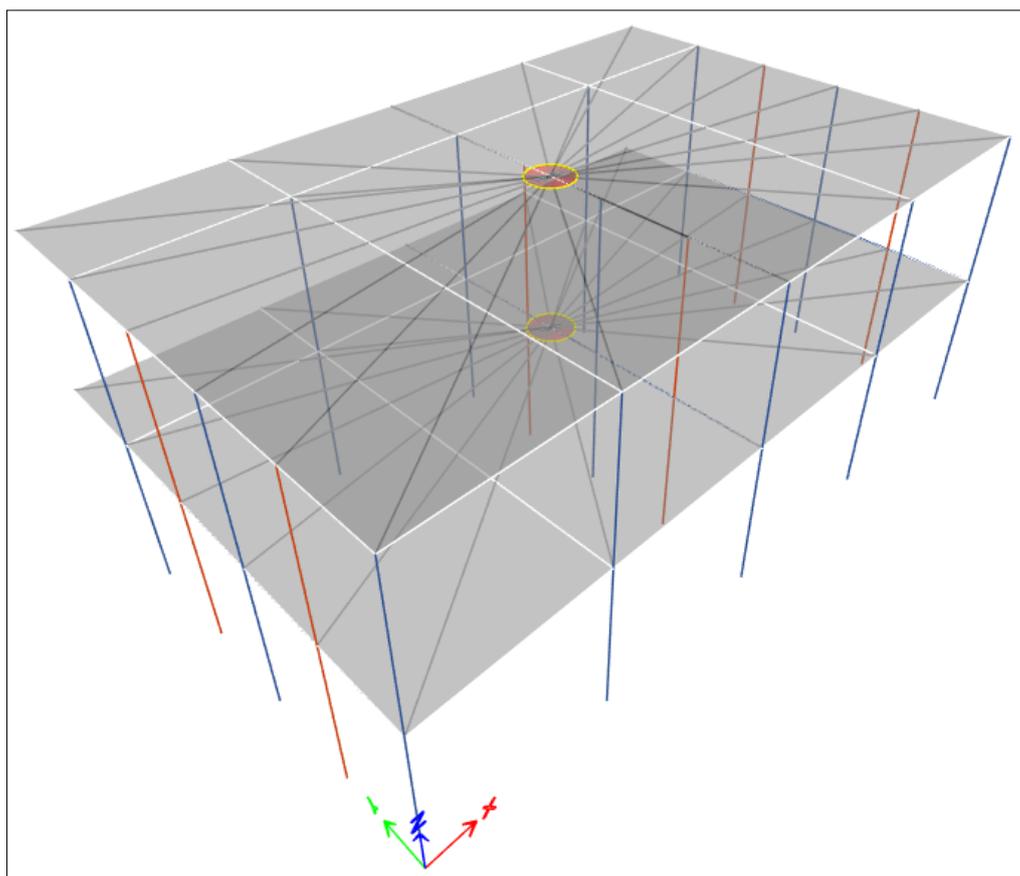
Carga Viva	
Losa - Aula	250 kg/m ²
Losa - Corredor	400 kg/m ²
Losa - Techo	100 kg/m ²

Fuente: Elaboración propia

La Norma Diseño Sismorresistente E.030 nos brinda la estimación del peso para una edificación esencial, el cual se calcula adicionando el 100% de la carga permanente, el 50% de la carga viva y en caso de techos y azoteas se toma el 25% de la carga viva.

Al modelo se le asignó diafragmas rígidos, los cuales se caracterizan por ser losas que no se deforman ante fuerzas sísmicas y se incorporan a los muros portantes para compatibilizar los desplazamientos.

Ilustración 18: Diafragma rígido módulo 01



Fuente: Elaboración propia

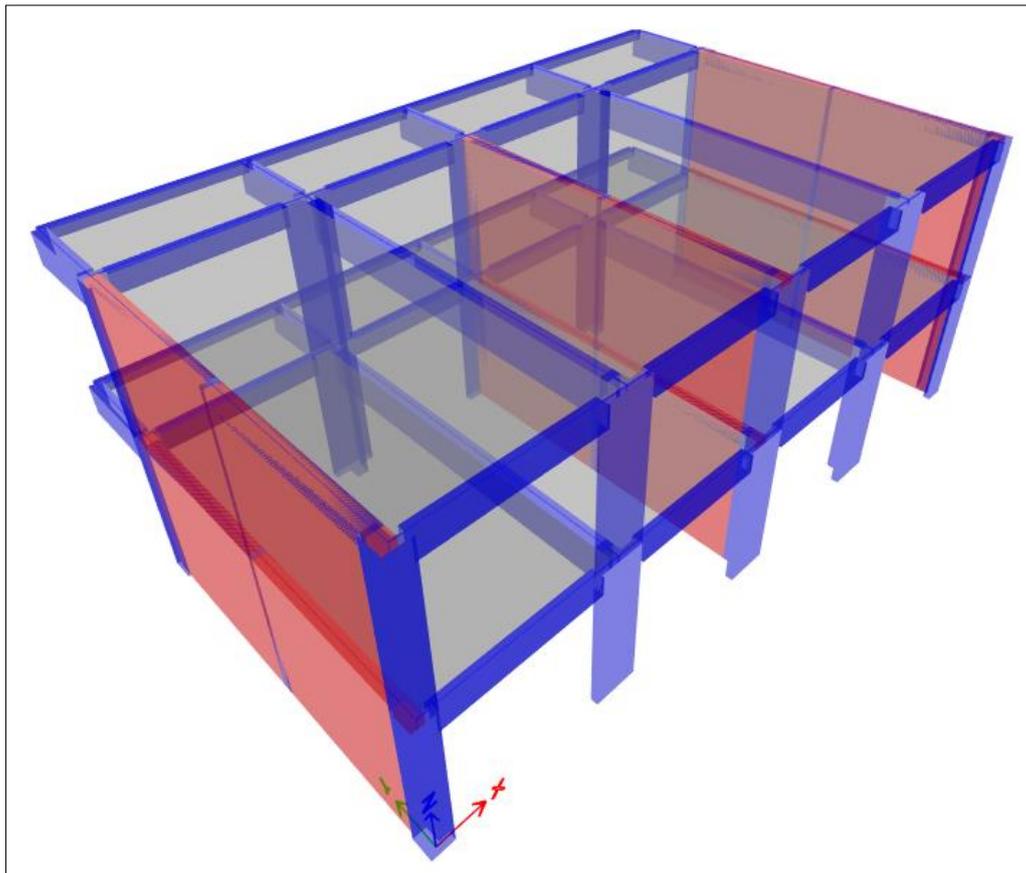
Análisis de fuerzas estáticas equivalentes

Este análisis representa un conjunto de fuerzas laterales aplicadas en los centros de gravedad de cada piso y agregado de momentos torsores. Estas fuerzas provienen de la cortante basal, la cual se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{basal} = \frac{Z * U * C * S}{R} * P$$

El expediente menciona que la estructura se encuentra en un suelo blando S_3 , zona sísmica 4, categoría de edificación A2, el coeficiente básico de reducción en X es para muros estructurales de concreto armado y en Y es para albañilería confinada. Teniendo en cuenta que actualmente la Norma E.030, para esta categoría de edificación y zona sísmica, no permite ninguna irregularidad.

Ilustración 19: Modelamiento del módulo 01 en Etabs



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se va a proceder con el cálculo de la cortante basal tanto para la dirección X como para la dirección Y.

Tabla 8: Masa del módulo 01

Masa en Diafragmas			
Piso	Diafragmas	Masa X	Masa Y
		tonf-s ² /m	tonf-s ² /m
Piso 2	D2	9.95	9.95
Piso 1	D1	17.19	17.19

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se muestra la masa de la estructura, la cual se va a utilizar para el cálculo de la cortante basal. A continuación, se calcula el peso de la edificación.

$$Peso = m * g = (17.19 + 9.95) * 9.81 = 266.24 \text{ tn}$$

Tabla 9: Cálculo de la cortante basal módulo 01

Factores Sísmicos	Dirección	Dirección
	X	Y
Z	0.45	0.45
U	1.50	1.50
S	1.10	1.10
T _P	1.00	1.00
T _L	1.60	1.60
T	0.266	0.142
C	2.50	2.50
R ₀	6.00	3.00
I _a	1.00	1.00
I _p	1.00	1.00
R	6.00	3.00
$\frac{Z * U * C * S}{R} =$	0.3094	0.6188
V_{basal} =	82.37 tn	164.75 tn

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la Tabla 9, la cortante basal en la dirección X es 82.37 tn y en dirección Y es 164.75 tn.

Análisis Dinámico Modal Espectral

El análisis modal espectral tiene las siguientes consideraciones: la suma de masa participativa de cada modo de vibración debe superar el 90% de la masa total de la estructura, una excentricidad del 5% de la dimensión perpendicular al análisis en estudio.

En este análisis se va a definir un espectro de pseudo aceleraciones para cada dirección en estudio, tanto para la dirección X e Y, y se calcula con la siguiente expresión:

$$S_a = \frac{Z * U * S * C}{R} * g$$

Donde “g” es la aceleración de la gravedad

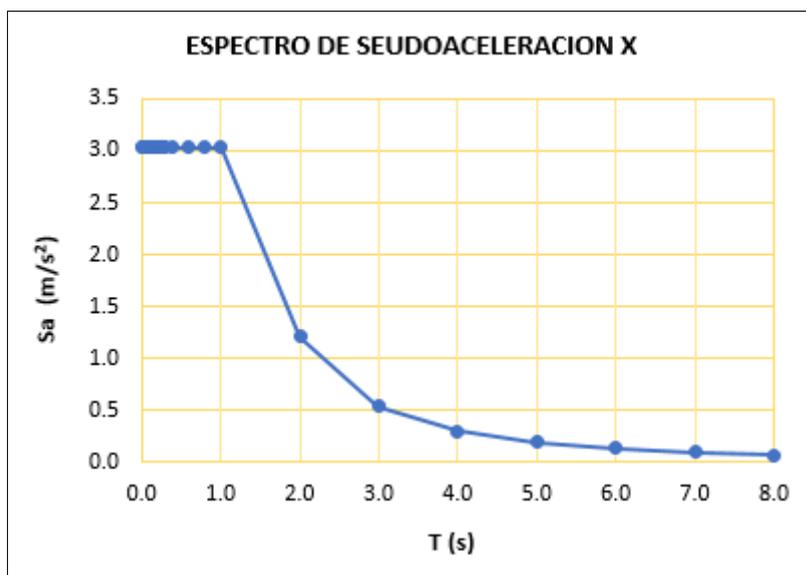
A continuación, se realiza el cálculo del espectro de pseudo aceleración.

Ilustración 20: Datos del espectro de pseudo aceleración X - módulo 01

T	C	Sa X-X (m/s ²)
0.00	2.500	3.0350
0.02	2.500	3.0350
0.04	2.500	3.0350
0.06	2.500	3.0350
0.08	2.500	3.0350
0.10	2.500	3.0350
0.12	2.500	3.0350
0.14	2.500	3.0350
0.16	2.500	3.0350
0.18	2.500	3.0350
0.20	2.500	3.0350
0.22	2.500	3.0350
0.24	2.500	3.0350
0.26	2.500	3.0350
0.28	2.500	3.0350
0.30	2.500	3.0350
0.40	2.500	3.0350
0.60	2.500	3.0350
0.80	2.500	3.0350
1.00	2.500	3.0350
2.00	1.000	1.2140
3.00	0.444	0.5396
4.00	0.250	0.3035
5.00	0.160	0.1942
6.00	0.111	0.1349
7.00	0.082	0.0991
8.00	0.063	0.0759

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 21: Espectro de pseudo aceleración X - módulo 01



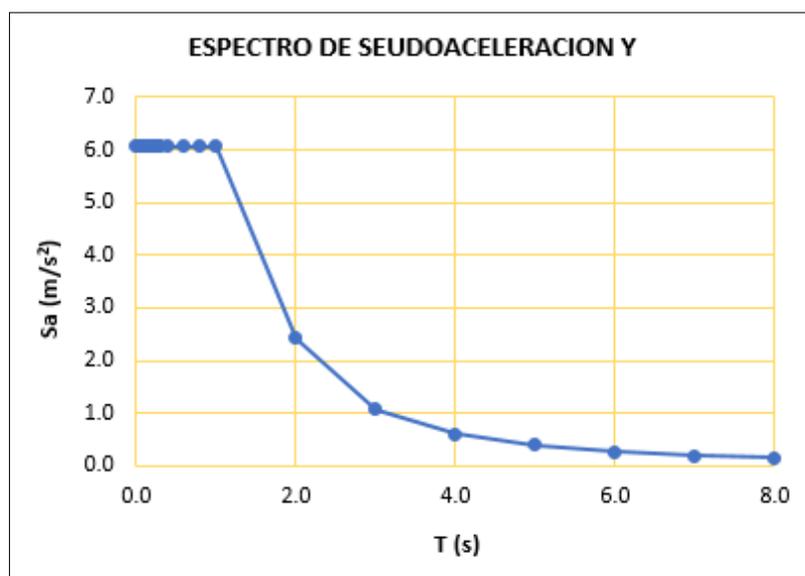
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 22: Datos del espectro de pseudo aceleración Y - módulo 01

T	C	Sa Y-Y (m/s ²)
0.00	2.500	6.0699
0.02	2.500	6.0699
0.04	2.500	6.0699
0.06	2.500	6.0699
0.08	2.500	6.0699
0.10	2.500	6.0699
0.12	2.500	6.0699
0.14	2.500	6.0699
0.16	2.500	6.0699
0.18	2.500	6.0699
0.20	2.500	6.0699
0.22	2.500	6.0699
0.24	2.500	6.0699
0.26	2.500	6.0699
0.28	2.500	6.0699
0.30	2.500	6.0699
0.40	2.500	6.0699
0.60	2.500	6.0699
0.80	2.500	6.0699
1.00	2.500	6.0699
2.00	1.000	2.4280
3.00	0.444	1.0791
4.00	0.250	0.6070
5.00	0.160	0.3885
6.00	0.111	0.2698
7.00	0.082	0.1982
8.00	0.063	0.1517

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 23: Espectro de pseudo aceleración Y - módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Períodos y participación modal

Como se muestra en la Tabla 10 y 11, la participación modal dinámica llega al 100 %, superando lo que indica la Norma E.030 Diseño Sismorresistente. La estructura cuenta con un período en X de 0.266s y en la dirección Y con 0.142 s, deduciendo que en la dirección X presenta menor rigidez en comparación con la dirección Y. Además, el primer modo de vibración actúa en la dirección X, con una masa participativa del 85.2% y el segundo modo de vibración actúa en la dirección Y, con una masa participativa del 82.3%.

Tabla 10: Participación modal -módulo 01

Participación Modal				
Case	ItemType	Item	Static	Dynamic
			%	%
Modal	Acceleration	UX	100	100
Modal	Acceleration	UY	100	100
Modal	Acceleration	UZ	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Períodos y participación modal – módulo 01

Periodo y Participación Modal								
Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Modal	1	0.266	0.852	0.000	0	0.852	0.000	0
Modal	2	0.142	0.000	0.823	0	0.852	0.823	0
Modal	3	0.14	0.002	0.000	0	0.854	0.823	0
Modal	4	0.081	0.146	0.000	0	1.000	0.823	0
Modal	5	0.043	0.000	0.177	0	1.000	1.000	0
Modal	6	0.042	0.000	0.000	0	1.000	1.000	0

Fuente: Elaboración propia

Control de distorsiones

La Norma E.030 menciona que los desplazamientos laterales inelásticos en una estructura regular se calculan multiplicando 0.75 R a los resultados obtenidos del análisis lineal elástico. Teniendo en consideración que la deriva es la división entre el desplazamiento relativo de un entrepiso y su altura respectiva. Como se puede observar en la dirección X la deriva no supera el 0.007 y en la dirección Y no supera el 0.005.

Tabla 12: Control de distorsiones módulo 01

Dirección X						
Piso	Altura (cm)	Desplazamiento Máximo	Desplazamiento Real Absoluto	Desplazamiento Real Relativo	Deriva	Verificación
Piso 2	320	0.7582	3.4119	1.9022	0.0059	SI CUMPLE
Piso 1	335	0.3355	1.50975	1.5098	0.0045	SI CUMPLE
Dirección Y						
Piso	Altura (cm)	Desplazamiento Máximo	Desplazamiento Real Absoluto	Desplazamiento Real Relativo	Deriva	Verificación
Piso 2	320	0.4727	1.063575	0.6350	0.0020	SI CUMPLE
Piso 1	335	0.1905	0.428625	0.4286	0.0013	SI CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

Verificación de irregularidades

La normativa no permite ninguna irregularidad para la categoría de edificación A2 ubicada en la zona sísmica 4.

a) Irregularidad en altura

- Irregularidad de Piso Blando: Una estructura presenta irregularidad cuando la rigidez de un piso es menor del 70% de la rigidez de un piso inmediato superior. La rigidez se calcula como la división de la cortante del entrepiso y su respectivo desplazamiento en el centro de masa.

Tabla 13: Irregularidad de piso blando - módulo 01

Dirección X-X						
Piso	Cortante (tn)	Desp. Abs (m)	Desp. Relativo (m)	Rigidez (tn/m)	Verificación 1	
Piso 1	71.22	0.0032	0.0032	22339.84	2.18	REGULAR
Piso 2	40.81	0.0072	0.0040	10232.10		

Dirección Y-Y						
Piso	Cortante (tn)	Desp. Abs (m)	Desp. Relativo (m)	Rigidez (tn/m)	Verificación 1	
Piso 1	138.75	0.0017	0.0017	83480.75	2.50	REGULAR
Piso 2	82.25	0.0041	0.0025	33406.99		

Fuente: Elaboración propia

b) Irregularidad en planta

- Irregularidad Torsional: La estructura es regular debido a que el desplazamiento máximo de los extremos es menor que 1.3 veces el desplazamiento promedio de los extremos del entrepiso.

Tabla 14: Irregularidad torsional - módulo 01

Dirección X-X												
Piso	Desp-abs 1 (cm)	Desp-abs 2 (cm)	Desp-abs 3 (cm)	Desp-abs 4 (cm)	Desp-rel 1 (cm)	Desp-rel 2 (cm)	Desp-rel 3 (cm)	Desp-rel 4 (cm)	Max - Desp (cm)	Prom-Despl (cm)	Verificacion	
Piso 1	0.3116	0.3116	0.3355	0.3355	0.31	0.31	0.34	0.34	0.34	0.32	1.037	REGULAR
Piso 2	0.7009	0.7009	0.7582	0.7582	0.39	0.39	0.42	0.42	0.42	0.41	1.041	REGULAR

Dirección Y-Y												
Piso	Desp-abs 1 (cm)	Desp-abs 2 (cm)	Desp-abs 3 (cm)	Desp-abs 4 (cm)	Desp-rel 1 (cm)	Desp-rel 2 (cm)	Desp-rel 3 (cm)	Desp-rel 4 (cm)	Max - Desp (cm)	Prom-Despl (cm)	Verificacion	
Piso 1	0.1905	0.1905	0.1905	0.1905	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	1.000	REGULAR
Piso 2	0.4727	0.4727	0.4727	0.4727	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	1.000	REGULAR

Fuente: Elaboración propia

Con esto concluimos que la estructura es regular, tanto en planta como en altura, respetando lo que indica la Norma E.030. Por lo tanto, I_a e I_p toman valores de 1.

Fuerza cortante mínima

La cortante que se obtiene del análisis sísmico modal espectral debe ser por lo menos el 80% de la obtenida del análisis de fuerzas estáticas equivalentes. Como se puede apreciar en la Tabla 15, tanto en la dirección X como en la dirección Y, la cortante producida por el análisis dinámico es mayor que el 80% de la cortante del análisis estático.

Tabla 15: Fuerza cortante mínima - módulo 01

Dirección X		Dirección Y	
VXE	82.37 Tn	VYE	164.74 Tn
0.8 VXE=	65.90 Tn	0.8 VYE=	131.79 Tn
VXD =	71.22 Tn	VYD =	138.75 Tn
FC =	0.925	FC =	0.950

Fuente: Elaboración propia

Verificación del sistema estructural de albañilería confinada

a) Densidad de muros

La norma E.070 Albañilería menciona que debe existir una densidad mínima de muros portantes en un área de planta de una estructura.

Ilustración 24: Densidad mínima de muros portantes - módulo 01

EJE Y			
Muro	Longitud (m)	Espesor (m)	Longitud x Espesor
MY1	7.59	0.25	1.90
MY2	7.59	0.25	1.90
MY3	7.59	0.25	1.90
			5.69
Area en Planta :		146.0 m ²	
Z :	0.45		
U :	1.5		
S :	1.1		
N :	2		
$\frac{\sum \text{Longitud x Espesor}}{\text{Area de planta}}$		\geq	$\frac{Z * U * S * N}{56}$
0.039		\geq	0.027
SI CUMPLE			

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la Ilustración 24, tomando solo en consideración los muros portantes de albañilería, la densidad es más que suficiente, por lo que concluimos que la estructura si cumple con uno de los requisitos que indica la Norma E.070.

b) Verificación de esfuerzos axiales

Se debe realizar la verificación de los esfuerzos axiales de cada muro con la finalidad de prevenir fallas por pandeo o la reducción de ductilidad cuando el muro está sometido a fuertes cargas sísmicas.

Ilustración 25: Cálculo del esfuerzo axial máximo - módulo 01

$f'm =$	65 kg/cm ²	$\frac{P_m}{L * t} \leq 0.2 * f'm * \left[1 - \left(\frac{h}{35 * t} \right)^2 \right] \leq 0.15 * f'm$					
$h =$	305 cm						
ESFUERZO AXIAL MAXIMO- PISO 1							
MURO	Pm (kg)	L (cm)	t (cm)	σ_m (kg/cm ²)	$0.2 * f'm * \left[1 - \left(\frac{h}{35 * t} \right)^2 \right]$	$0.15 * f'm$	Verificación
MY1	56230.64	759	25	2.963	11.42	9.75	SI CUMPLE
MY2	81792.18	759	25	4.311	11.42	9.75	SI CUMPLE
MY3	56230.64	759	25	2.963	11.42	9.75	SI CUMPLE
$f'm =$	65 kg/cm ²	$\frac{P_m}{L * t} \leq 0.2 * f'm * \left[1 - \left(\frac{h}{35 * t} \right)^2 \right] \leq 0.15 * f'm$					
$h =$	290 cm						
ESFUERZO AXIAL MAXIMO - PISO 2							
MURO	Pm (kg)	L (cm)	t (cm)	σ_m (kg/cm ²)	$0.2 * f'm * \left[1 - \left(\frac{h}{35 * t} \right)^2 \right]$	$0.15 * f'm$	Verificación
MY1	24567.03	759	25	1.295	11.57	9.75	SI CUMPLE
MY2	33749.85	759	25	1.779	11.42	9.75	SI CUMPLE
MY3	24567.03	759	25	1.295	11.42	9.75	SI CUMPLE

Fuente: elaboración propia

Como se aprecia en la Ilustración 25, los muros presentan esfuerzos axiales menores a la que indica la Norma E.070 Albañilería.

c) Control de fisuración

Se debe verificar que los muros no se fisuren, es por ello que la fuerza cortante del muro producida por el sismo moderado debe ser menor al 55% de la fuerza cortante asociada al agrietamiento diagonal.

Ilustración 26: Control de fisuración - módulo 01

$V'_m = 8.1 \text{ kg/cm}^2$
 $V_e \leq 0.55 * V_m$
 $\frac{1}{3} \leq \alpha = \frac{V_e * L}{M_e} \leq 1$
 $V_m = 0.5 * v'_m * \alpha * t * L + 0.23 * P_g$

CONTROL DE FISURACION - PISO 1									
MURO	L (m)	t (m)	Pg (tn)	Ve (tn)	Me (tn.m)	α	Vm (tn)	0.55Vm	Verificación
MY1	7.59	0.25	52.66	24.43	118.95	1.0	88.96	48.93	NO FISURADO
MY2	7.59	0.25	74.84	21.63	105.40	1.0	94.06	51.73	NO FISURADO
MY3	7.59	0.25	52.66	24.43	118.95	1.0	88.96	48.93	NO FISURADO

Donde
 Pg : Carga de gravedad con 50% de carga viva
 Ve : Fuerza cortante del muro producida por el sismo moderado
 Me : Momento flector del muro producida por el sismo moderado
 α : Factor de reducción de resistencia al corte por efectos de esbeltez

CONTROL DE FISURACION - PISO 2									
MURO	L (m)	t (m)	Pg (tn)	Ve (tn)	Me (tn.m)	α	Vm (tn)	0.55Vm	Verificación
MY1	7.59	0.25	23.62	13.23	42.99	1.0	82.28	45.25	NO FISURADO
MY2	7.59	0.25	31.89	11.68	38.19	1.0	84.18	46.30	NO FISURADO
MY3	7.59	0.25	23.62	13.23	42.99	1.0	82.28	45.25	NO FISURADO

Fuente: Elaboración propia

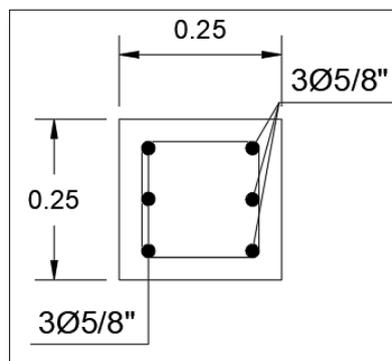
En la Ilustración 26 se observa que los muros portantes no se fisuran ante la presencia de un sismo moderado, cumpliendo lo que indica la norma.

Análisis estático no lineal

Propiedades no lineales de los materiales

Con la finalidad de saber el comportamiento no lineal de los materiales se ha elegido el modelo de Mander para el concreto confinado. A continuación, se realizará los cálculos tanto para el concreto confinado como sin confinar y luego vamos a comparar los resultados con el Software ETABS y SAP 2000. La sección a trabajar es la siguiente:

Ilustración 27: Sección de columna 0.25 x 0.25 m



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 28: Datos importantes de la columna 0.25 x 0.25 m

1. DATOS			
$f'c =$	210	kg/cm ²	Resistencia a la compresion del concreto
$E_c =$	217370.651	kg/cm ²	Modulo de Elasticidad del concreto
$\epsilon_0 =$	0.002		Deformacion del concreto para el $f'c$
$f_y =$	4200	kg/cm ²	Esfuerzo de fluencia del acero
$\epsilon_{su} =$	0.09		Deformacion ultima del acero de refuerzo
$b =$	25	cm	Base de la columna
$h =$	25	cm	Peralte de la columna
$r =$	4	cm	Recubrimiento
$S_c =$	10	cm	Separacion eje a eje de estribos

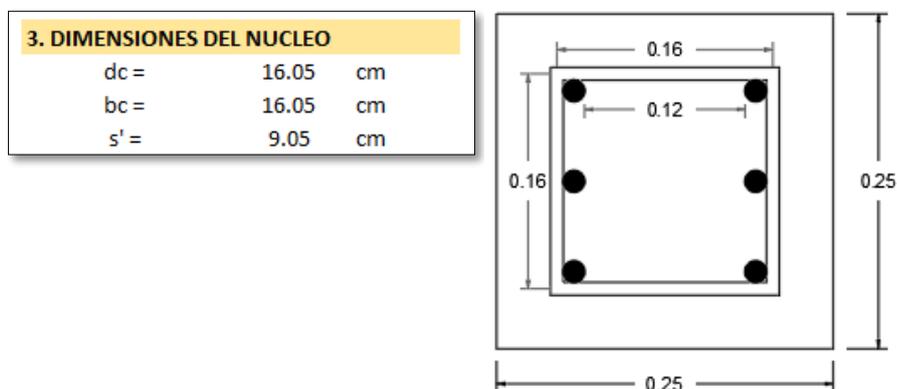
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 29: Características del refuerzo de la columna 0.25 x 0.25 m

2. CARACTERÍSTICAS DEL REFUERZO			
$\phi_{\text{esquina}} =$	5/8		Diametro de la varilla longitudinal en esquina
$\phi_{\text{interior}} =$	5/8		Diametro de la varilla longitudinal interior
Nº varillas =	6		Numero total de varillas en la seccion
$\phi_{\text{estribo}} =$	3/8		Diametro del estribo
Nº de líneas en X =	2		Numero de líneas de estribos en X
Nº de líneas en Y =	2		Numero de líneas de estribos en Y

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 30: Dimensiones del núcleo de la columna 0.25 x 0.25 m



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 31: Cálculo del coeficiente de confinamiento efectivo - columna 0.25 x 0.25 m

4. CALCULO DEL COEFICIENTE DE CONFINAMIENTO EFECTIVO			
Wx =	11.92	cm	
Wy =	11.92	cm	
Area inefectiva =	94.72	cm ²	
Area efectiva =	83.98	cm ²	
pcc =	0.0524	Ratio	
Acc =	244.11	cm ²	
Kee =	0.3440		

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en las Ilustraciones anteriores, la sección es de 0.25x0.25m con una resistencia a la compresión sin confinamiento de 210 kg/cm² con su respectiva deformación de 0.002, el acero de refuerzo tiene un esfuerzo de 4200 kg/cm² con su deformación última de 0.09. Tenemos 6 varillas longitudinales de 5/8" con estribos de 3/8" y un recubrimiento de 4 cm. Con ello vamos a calcular el núcleo confinado, teniendo un valor en ambas direcciones de 16.05 cm. El espaciamiento de cara a cara de varillas longitudinales es 11.92 cm, esto nos facilita el cálculo para el área efectiva. Asimismo, se calcula los esfuerzos de confinamiento con el fin de poder obtener un factor de amplificación para el f'c. El esfuerzo del concreto confinado es 277.20 kg/cm² con una deformación de 0.0052. Finalmente se calcula la deformación última del concreto con su respectivo esfuerzo.

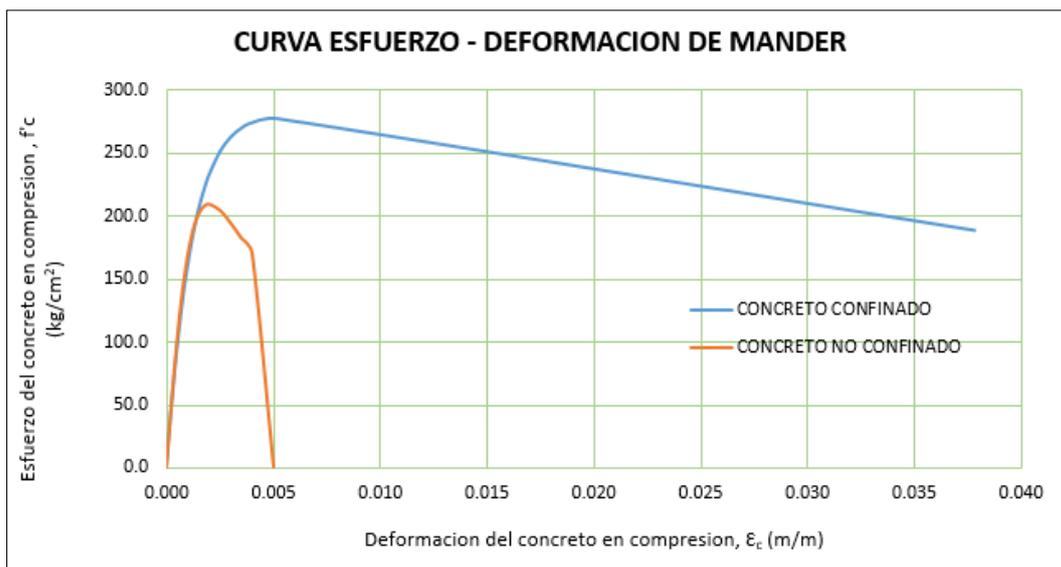
Ilustración 32: Esfuerzos de confinamiento y datos para la curva esfuerzo - deformación de la columna 0.25 x 0.25 m

5. ESFUERZOS DE CONFINAMIENTO			
psx =	0.009		
psy =	0.009		
f1x =	12.784	kg/cm ²	
f1y =	12.784	kg/cm ²	
f1x/fco =	0.0609		
f1y/fco =	0.0609		
f'cc/fco =	1.32		
f'cc =	277.2	kg/cm ²	
Ecc =	0.0052		
Ecc/Eo =	2.6		
Esec =	53307.7	kg/cm ²	
Ec/Esec =	4.1		
r =	1.32		
ps =	0.0177		
Ecu =	0.0378		
Ecu/Eco =	18.89		
Ecu/Ecc =	7.27		

CONFINADO		NO CONFINADO	
Ec	fc (kg/cm ²)	Ec	fc (kg/cm ²)
0.0000	0.00	0.0000	0.00
0.0002	41.76	0.0002	42.94
0.0004	78.84	0.0004	83.00
0.0006	110.90	0.0006	118.11
0.0008	138.26	0.0008	147.14
0.0010	161.45	0.0010	169.82
0.0012	181.01	0.0012	186.53
0.0014	197.48	0.0014	198.02
0.0016	211.34	0.0016	205.18
0.0018	222.98	0.0018	208.91
0.0020	232.76	0.0020	210.00
0.0025	250.85	0.0025	205.23
0.0030	262.42	0.0030	194.97
0.0035	269.65	0.0035	182.91
0.0040	273.94	0.0040	170.80
0.0052	277.20	0.0050	0.00
0.0378	188.39		

Fuente: Elaboración propia

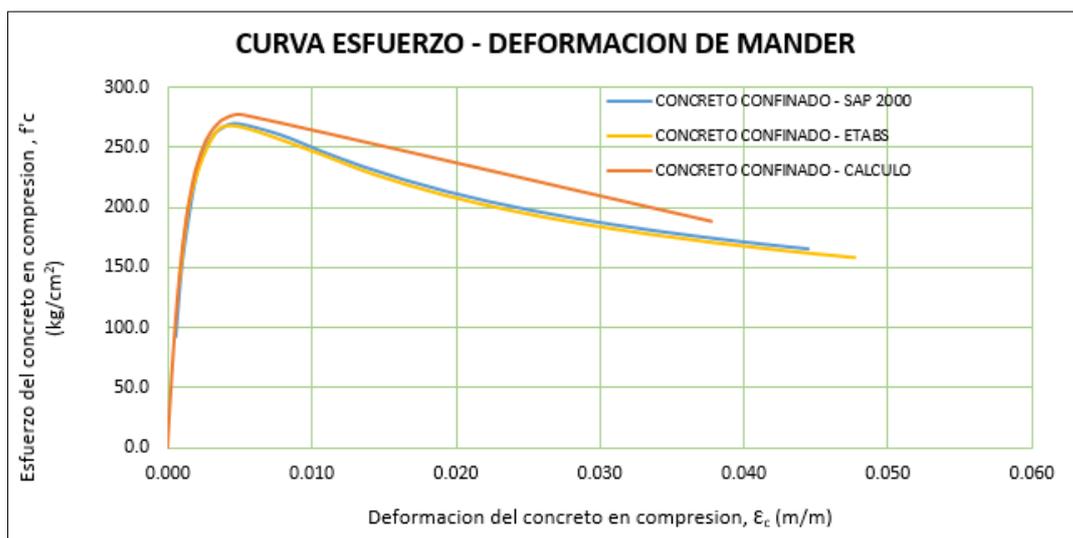
Ilustración 33: Curva esfuerzo - deformación de la columna 0.25 x 0.25 m



Fuente: Elaboración propia

Ahora vamos a utilizar el Software ETABS y SAP 2000 esperando que los resultados se asemejen al cálculo realizado anteriormente.

Ilustración 34: Curva esfuerzo deformación del software y cálculo



Fuente: Elaboración propia

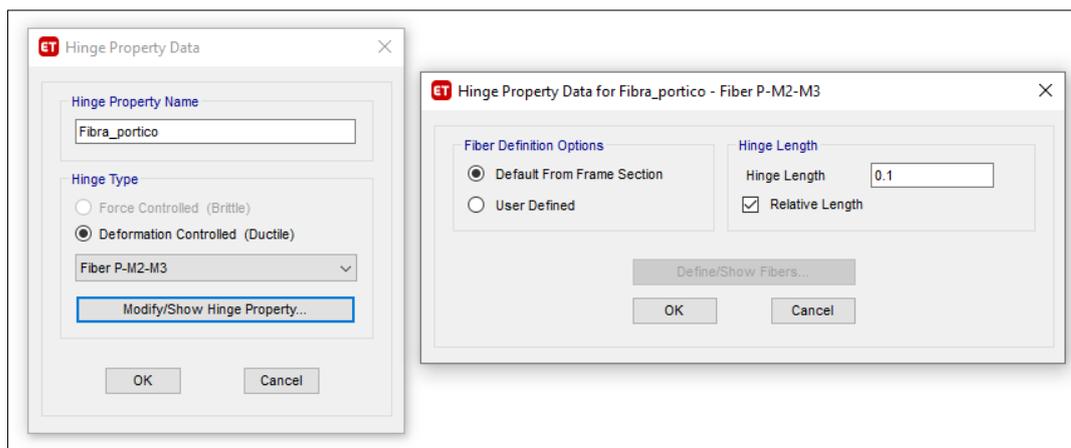
Con las Ilustraciones anteriores nos damos cuenta que el esfuerzo del concreto confinado no varía mucho mediante el cálculo y el uso del Software.

Asignación de rótulas plásticas en los elementos estructurales

Con el objetivo de determinar la capacidad de la estructura y estimar el punto de desempeño ante un sismo máximo, se debe indicar en el modelamiento la ubicación de las rotulas plásticas. Una rótula plástica es el punto donde se puede observar la no linealidad de cada elemento estructural. En particular se consideró la formación de rotulas plásticas tipo fibra (P-M2-M3) para columnas y vigas, en el caso del muro de albañilería se le asignó una rótula a corte con sus propiedades no lineales.

- **Rótulas en vigas, columnas y muros de concreto armado:** Se colocan a una cierta distancia de los nudos y cuando ya no es capaz de resistir más momento a flexión o flexo compresión, empieza a rotar y los esfuerzos se redistribuyen hacia los otros elementos estructurales. Se colocan rótulas en los extremos, a una distancia de 0.10 de la longitud total del elemento, ya que en dicha zona existen mayores esfuerzos.

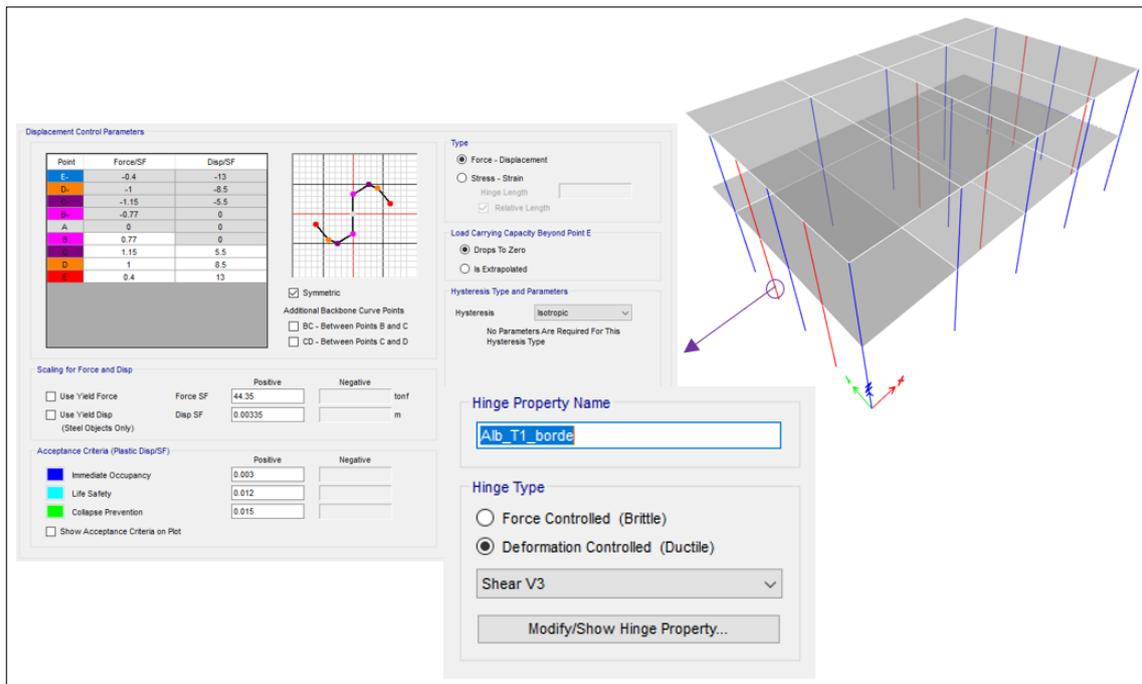
Ilustración 35: Rótulas plásticas en vigas y columnas



Fuente: Elaboración propia

- **Rótulas en los muros de albañilería:** Se les asigna una rótula por corte a una distancia de 0.5 de la longitud total del elemento estructural e indicando los valores de la curva de capacidad.

Ilustración 36: Asignación de rótula a corte en muro de albañilería

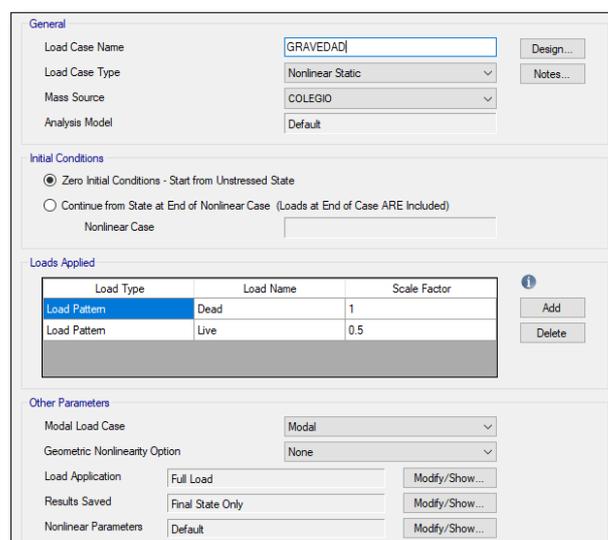


Fuente: Elaboración propia

Casos de carga

Se utiliza dos casos de carga: carga gravitacional no lineal y carga monótonica no lineal. La finalidad de este procedimiento es primero generar deformaciones a la estructura con la carga gravitacional y luego aplicar la carga monótonica hasta que el último nivel presente un máximo desplazamiento.

Ilustración 37: Creación de la carga gravitacional no lineal



Fuente: Elaboración propia

Para la creación del caso de carga gravitacional se considera lo siguiente:

- Tipo de carga: No lineal estático
- Se crea este tipo de carga desde una posición de estructura sin deformar
- Se agrega el patrón de cargas: $1 * CM + 0.50 * CV$

Para la creación de la carga monotónica no lineal se tiene las siguientes consideraciones:

- Tipo de carga: No lineal estático
- La condición inicial de la estructura es ya teniendo la carga gravitacional
- La distribución de las cargas debe ser proporcional a la forma del modo fundamental de vibración en la dirección en estudio. El primer modo de vibración es en la dirección X y el segundo modo es en la dirección Y.
- Se utilizará un análisis estático no lineal con un desplazamiento controlado, al cual se le da una magnitud y el programa aplicará las cargas para llegar a dicho desplazamiento. En la dirección X se utilizó un desplazamiento de 0.15 m y en la dirección Y tenemos un desplazamiento de 0.05 m, por tener mayor rigidez. Este desplazamiento se medirá en un punto cercano al centro de masas del último nivel, siendo el punto con etiqueta 23.

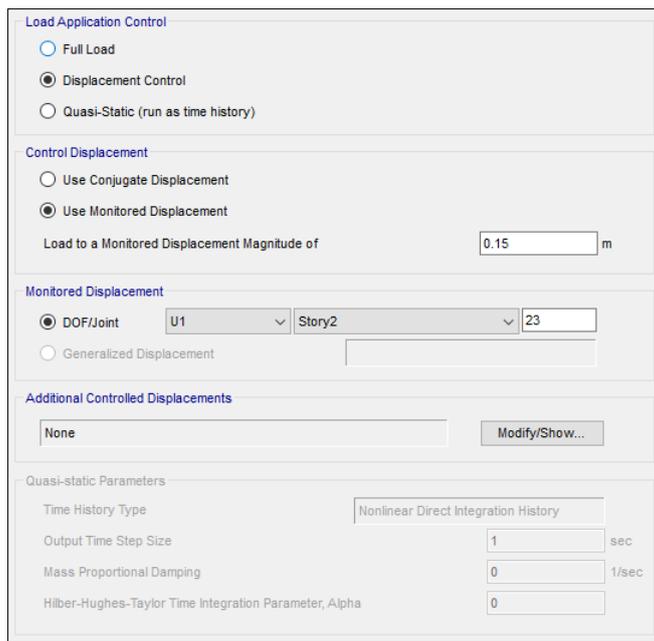
Ilustración 38: Creación de la carga monotónica no lineal en la dirección X

The screenshot displays the configuration for a nonlinear static load case. The 'General' section includes fields for 'Load Case Name' (ANLEXX), 'Load Case Type' (Nonlinear Static), 'Mass Source' (COLEGIO), and 'Analysis Model' (Default). The 'Initial Conditions' section shows the option 'Continue from State at End of Nonlinear Case' selected, with 'Nonlinear Case' set to GRAVEDAD. The 'Loads Applied' section contains a table with one row: Mode 1, Load Name 1, and Scale Factor -1. The 'Other Parameters' section includes 'Modal Load Case' (Modal), 'Geometric Nonlinearity Option' (None), 'Load Application' (Displacement Control), 'Results Saved' (Multiple States), and 'Nonlinear Parameters' (User Defined).

Load Type	Load Name	Scale Factor
Mode	1	-1

Fuente: Elaboración propia

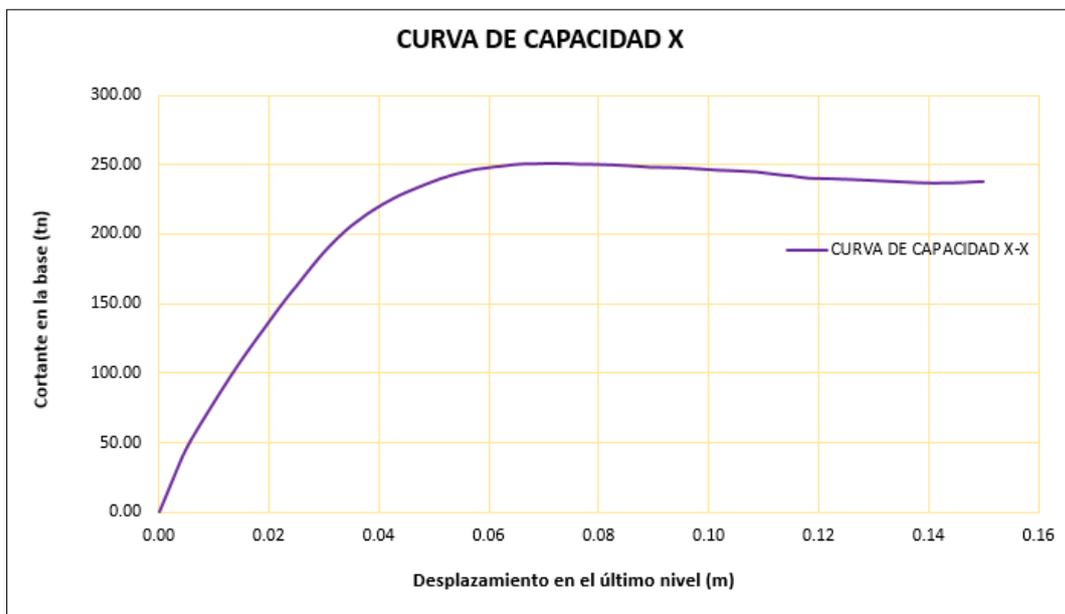
Ilustración 39: Control de desplazamiento en la dirección X



Fuente: Elaboración propia

Curva de capacidad de la estructura

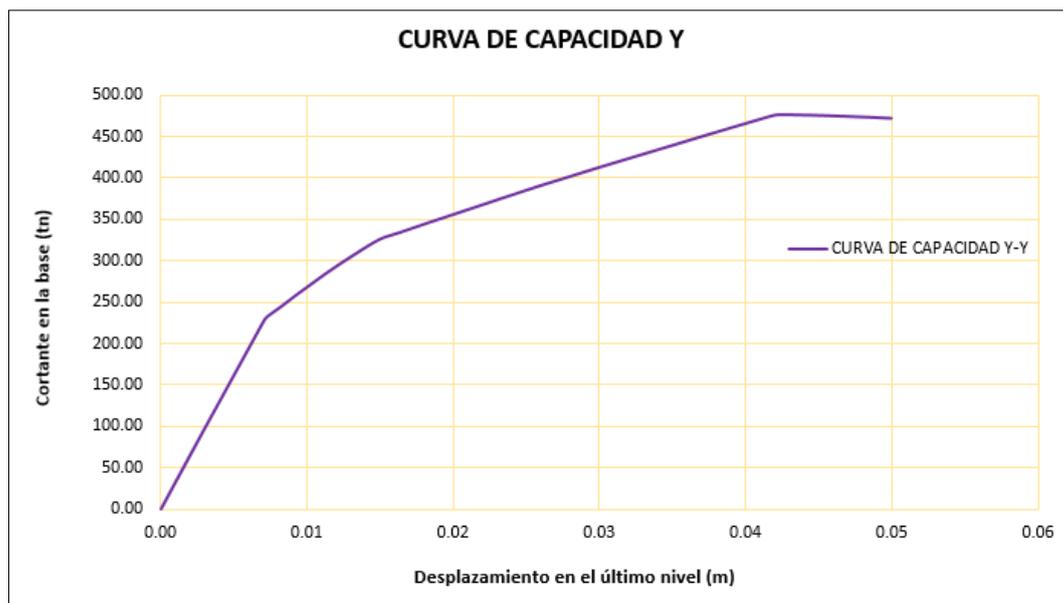
Ilustración 40: Curva de capacidad dirección X - módulo 01



Fuente: Elaboración propia

La curva de capacidad presenta al inicio una forma lineal, luego alcanza una cortante máxima de 251.32 tn con un desplazamiento de 0.072 m y finalmente llega a una cortante última de 238.28 tn con el desplazamiento controlado en el techo de 0.15 m.

Ilustración 41: Curva de capacidad dirección Y - módulo 01



Fuente: Elaboración propia

La curva de capacidad en la dirección Y comienza con una zona lineal, luego gana resistencia hasta llegar a una cortante máxima de 476.06 tn con un desplazamiento máximo en el techo de 0.042 m, y finalmente una cortante última de 471.78 tn con un desplazamiento en el último nivel de 5 cm.

Para entender mejor los resultados, una estructura flexible tiene menor cortante pero mayor desplazamiento, caso contrario sucede con una estructura rígida, ya que presenta mayor cortante, pero tiene menor desplazamiento.

Punto de desempeño

En la presente tesis se va a determinar el punto de desempeño por el método de los coeficientes según el ASCE/SEI 41-13

➤ Dirección X

El desplazamiento objetivo se calculará de la siguiente manera:

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * S_a * \frac{T_e^2}{4 * \pi^2} * g$$

$C_0 = 1.2$ (Factor de modificación para relacionar el desplazamiento de un sistema de un grado de libertad para el desplazamiento del techo con múltiples grados de libertad)

$a = 60$ (Factor dependiente del tipo de suelo)

$T_i = 0.266$ s (Período fundamental elástico del análisis dinámico)

$K_i = 9525.56$ tn/m (Rigidez lateral elástica de la estructura en la dirección X)

$K_e = 6729.18$ tn/m (Rigidez lateral efectiva obtenida de la curva bilineal)

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0.266 * \sqrt{\frac{9525.56}{6729.18}} = 0.316 \text{ s}$$

(Período fundamental efectivo en X)

$Z = 0.45$ (Factor de Zona)

$U = 1.50$ (Factor de uso)

$S = 1.10$ (Factor de suelo)

$T_p = 1.00$

$T_L = 1.60$

$C = 2.5$ $T < T_p$ (Factor de amplificación sísmica)

$R = 1.00$ (Coeficiente de reducción elástico)

$$S_a = \frac{Z * U * S * C}{R} = \frac{0.45 * 1.5 * 1.10 * 2.5}{1} = 1.856$$

$V_Y = 216.00$ tn (Límite elástico de la curva bilineal)

$W = 290.82$ tn (Peso Sísmico de la estructura)

$C_m = 1$ (Factor de masa participativa)

$$\mu_{\text{strength}} = \frac{1.856}{216/290.82} * 1 = 2.50$$

(Relación entre la demanda de resistencia elástica y el límite elástico)

$$C_1 = 1 + \frac{2.50 - 1}{60 * 0.316^2} = 1.25$$

(Factor de modificación que relaciona el desplazamiento máximo inelástico con el desplazamiento calculado elástico lineal)

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{2.50 - 1}{0.316} \right)^2 = 1.03$$

(Factor de modificación que representa el efecto de la forma de histéresis)

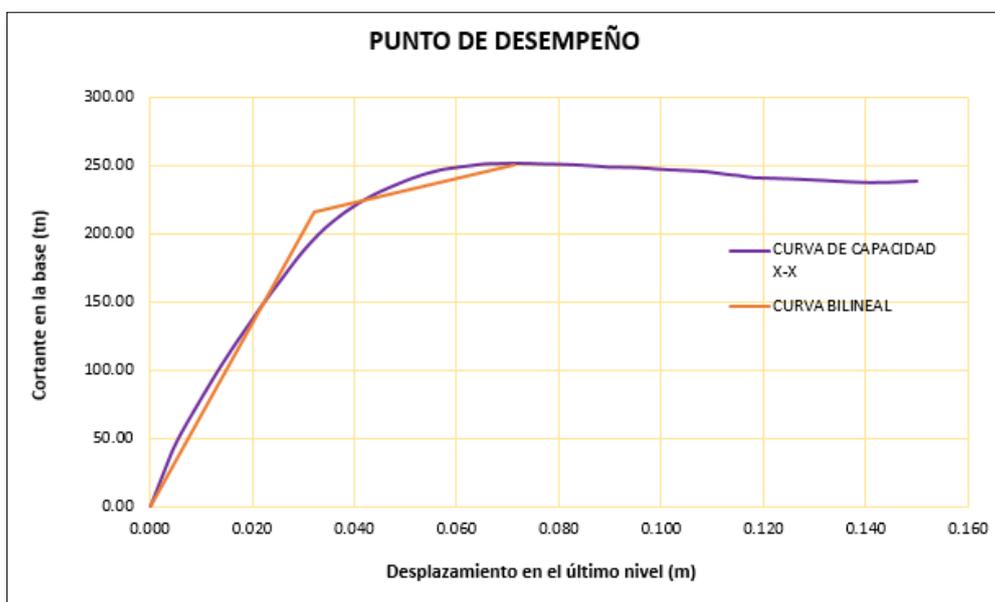
$$\delta_t = 1.2 * 1.25 * 1.03 * 1.856 * \frac{0.316^2}{4 * \pi^2} * 981 = 7.115 \text{ cm}$$

Tabla 16: Datos para la curva bilineal dirección X - módulo 01

Desplazamiento (m)	Cortante (tn)
0.00	0.00
0.032	216.00
0.071	250.90

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 42: Punto de desempeño en la dirección X - módulo 01



Fuente: Elaboración propia

El desplazamiento objetivo en la dirección X es 7.115 cm con una cortante de 250.90 tn, además se tiene un cortante límite elástico de la curva bilineal con un valor de 216 tn y un desplazamiento de 3.20 cm.

➤ Dirección Y

El desplazamiento objetivo se calculará de la siguiente manera:

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * S_a * \frac{T_e^2}{4 * \pi^2} * g$$

$C_0 = 1.2$ (Factor de modificación para relacionar el desplazamiento de un sistema de un grado de libertad para el desplazamiento del techo con múltiples grados de libertad)

$a = 60$ (Factor dependiente del tipo de suelo)

$T_i = 0.142$ s (Periodo fundamental elástico del análisis dinámico)

$K_i = 32699.29$ tn/m (Rigidez lateral elástica de la estructura en la dirección Y)

$K_e = 33101.27$ tn/m (Rigidez lateral efectiva obtenida de la curva bilineal)

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0.142 * \sqrt{\frac{32699.29}{33101.27}} = 0.14 \text{ s}$$

(Periodo fundamental efectivo en Y)

$Z = 0.45$ (Factor de Zona)

$U = 1.50$ (Factor de uso)

$S = 1.10$ (Factor de suelo)

$T_P = 1.00$

$T_L = 1.60$

$C = 2.5$ $T < T_P$ (Factor de amplificación sísmica)

$R = 1.00$ (Coeficiente de reducción elástico)

$$S_a = \frac{Z * U * S * C}{R} = \frac{0.45 * 1.5 * 1.10 * 2.5}{1} = 1.856$$

$V_Y = 261.50$ tn (Límite elástico de la curva bilineal)

$W = 290.82$ tn (Peso sísmico de la estructura)

$C_m = 1$ (Factor de masa participativa)

$$\mu_{strength} = \frac{1.856}{261.50/290.82} * 1 = 2.064$$

(Relación entre la demanda de resistencia elástica y el límite elástico)

$$C_1 = 1 + \frac{2.064 - 1}{60 * 0.14^2} = 1.89$$

(Factor de modificación que relaciona el desplazamiento máximo inelástico con el desplazamiento calculado elástico lineal)

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{2.064 - 1}{0.14} \right)^2 = 1.07$$

(Factor de modificación que representa el efecto de la forma de histéresis)

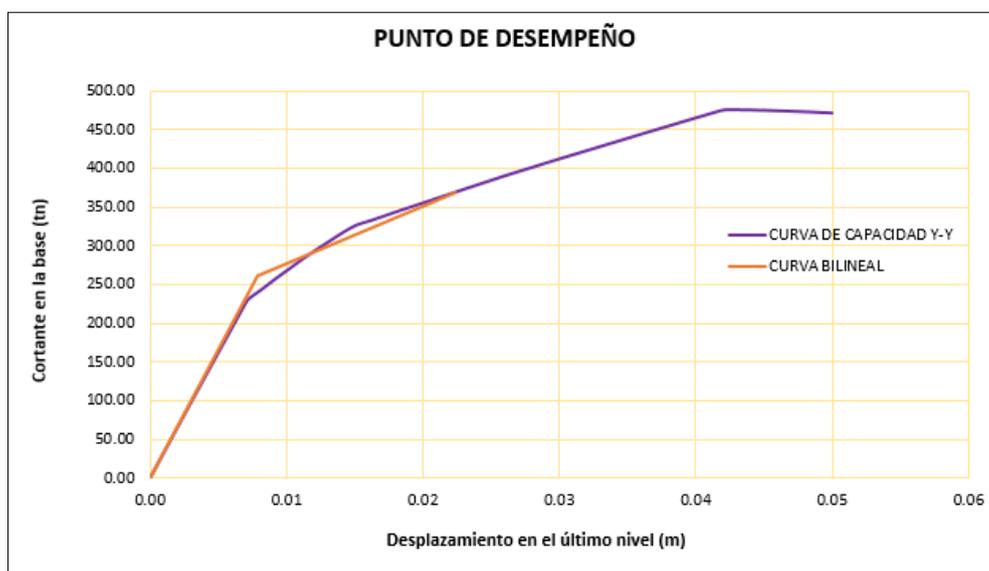
$$\delta_t = 1.2 * 1.89 * 1.07 * 1.856 * \frac{0.14^2}{4 * \pi^2} * 981 = 2.194 \text{ cm}$$

Tabla 17: Datos para la curva bilineal dirección Y - módulo 01

Desplazamiento (m)	Cortante (tn)
0.00	0.00
0.008	261.50
0.022	369.00

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 43: Punto de desempeño en la dirección Y - módulo 01



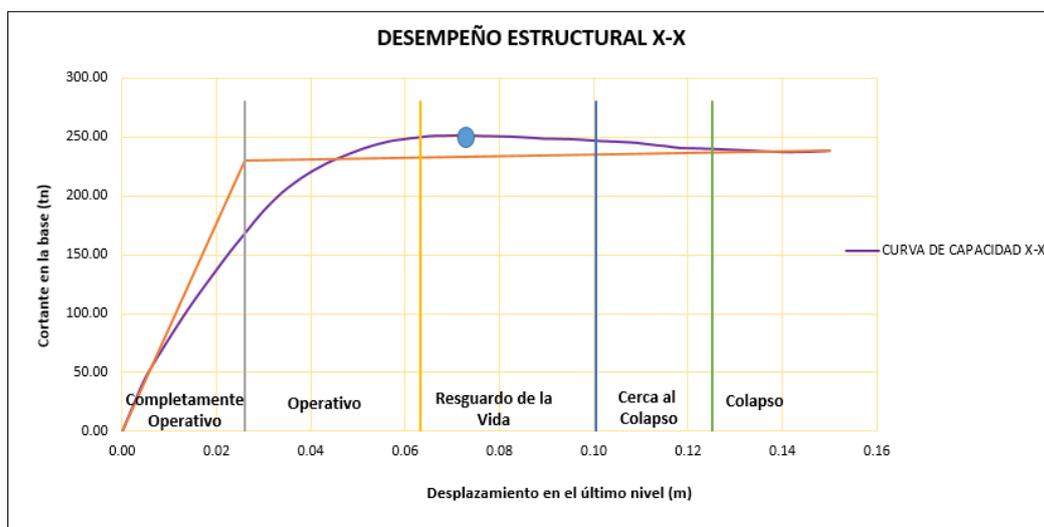
Fuente: Elaboración propia

El desplazamiento objetivo en la dirección Y es 2.194 cm con una cortante de 369.00 tn, además se tiene una cortante límite elástico de la curva bilineal con un valor de 261.50 tn y un desplazamiento de 0.8 cm.

Evaluación del desempeño sísmico

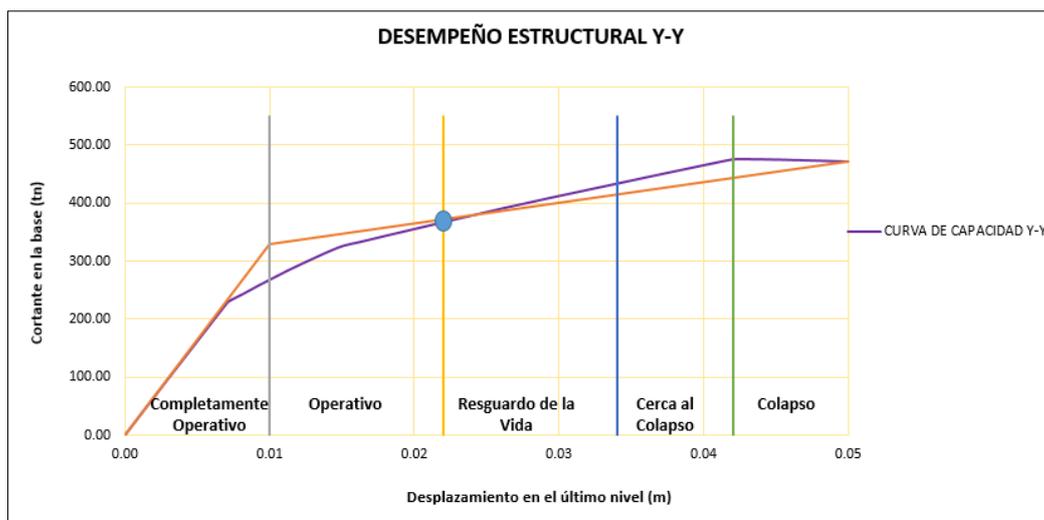
El desempeño de una edificación después de un sismo se califica en función del nivel de daño que sufre el sistema estructural. Según la propuesta del SEAOC, nuestra edificación en las dos direcciones se encuentra con un nivel de desempeño de resguardo de vida. Por lo tanto, presenta daños moderados en elementos estructurales y no estructurales, pérdida importante de resistencia y rigidez, pero aun así mantiene el margen de seguridad contra el colapso. Nuestro módulo en estudio cumple con los objetivos de la Norma E.030 donde indica que edificios esenciales en presencia de un sismo máximo, la estructura debe encontrarse en resguardo de vida.

Ilustración 44: Desempeño estructural dirección X - módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 45: Desempeño estructural dirección Y - módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Análisis dinámico no lineal

Para el análisis dinámico no lineal se utilizó el modelo inelástico realizado para el análisis estático no lineal, pero agregando el efecto cíclico de los elementos estructurales con el modelo pivot.

Registros sísmicos

La normativa indica que se debe emplear por lo menos 3 registros de aceleración en dos direcciones perpendiculares, los cuales deben ser escalados al espectro objetivo.

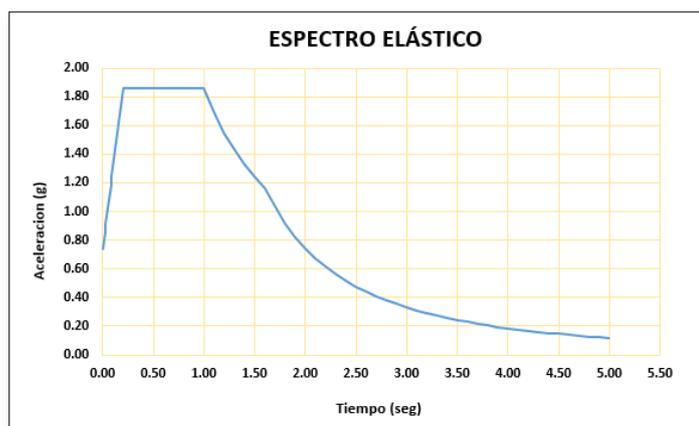
Tabla 18: Registros sísmicos para el análisis dinámico no lineal

Sismo	Fecha	Dirección	PGA (cm/s ²)	Magnitud
Lima 1966	17/10/1966	EW	-180.56	Mw 8.1
		NS	-268.24	
Pisco 2007	15/08/2007	EW	-272.82	Mw 6.8
		NS	333.66	
Lima 1974	03/10/1974	EW	-194.21	Mb 6.6
		NS	180.09	

Fuente: Elaboración propia

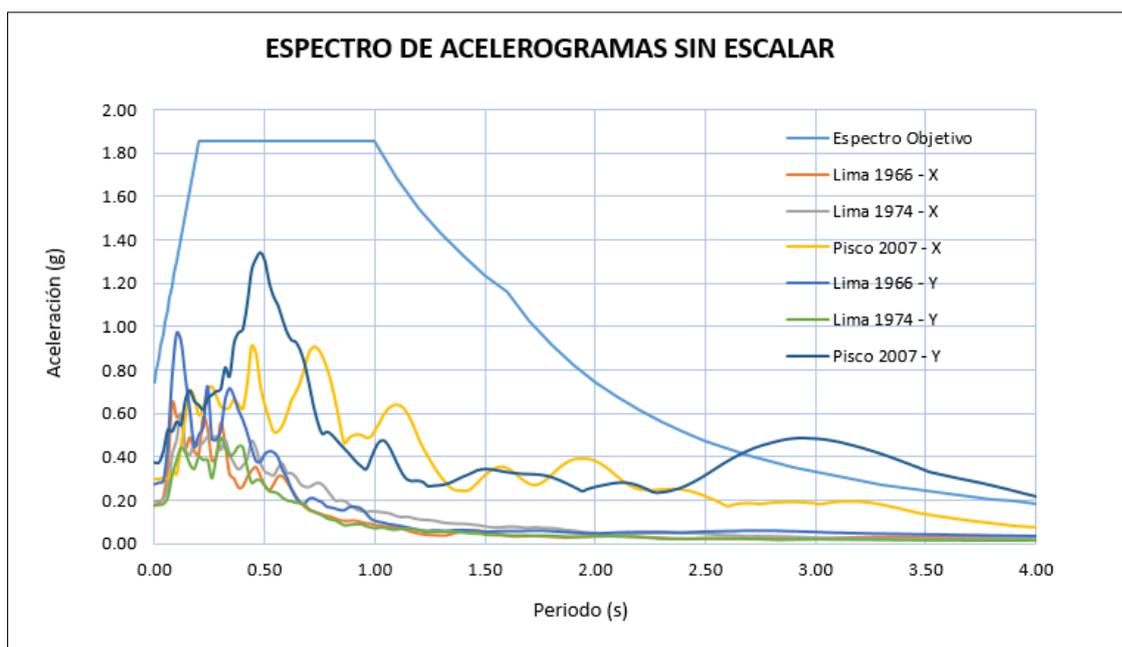
Ilustración 46: Espectro elástico

T (seg)	C	Sa (g)
0.00	1.000	0.7425
0.02	1.150	0.8539
0.04	1.300	0.9653
0.06	1.450	1.0766
0.08	1.600	1.1880
0.1	1.750	1.2994
0.2	2.500	1.8563
0.4	2.500	1.8563
0.6	2.500	1.8563
0.8	2.500	1.8563
1	2.500	1.8563
1.2	2.083	1.5469
1.4	1.786	1.3259
1.6	1.563	1.1602
1.8	1.235	0.9167
2	1.000	0.7425
2.2	0.826	0.6136
2.4	0.694	0.5156
2.6	0.592	0.4393
2.8	0.510	0.3788
3	0.444	0.3300
3.2	0.391	0.2900
3.4	0.346	0.2569
3.6	0.309	0.2292
3.8	0.277	0.2057
4	0.250	0.1856
4.2	0.227	0.1684
4.4	0.207	0.1534
4.6	0.189	0.1404
4.8	0.174	0.1289
5	0.160	0.1188



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 47: Espectros de acelerogramas sin escalar



Fuente: Elaboración propia

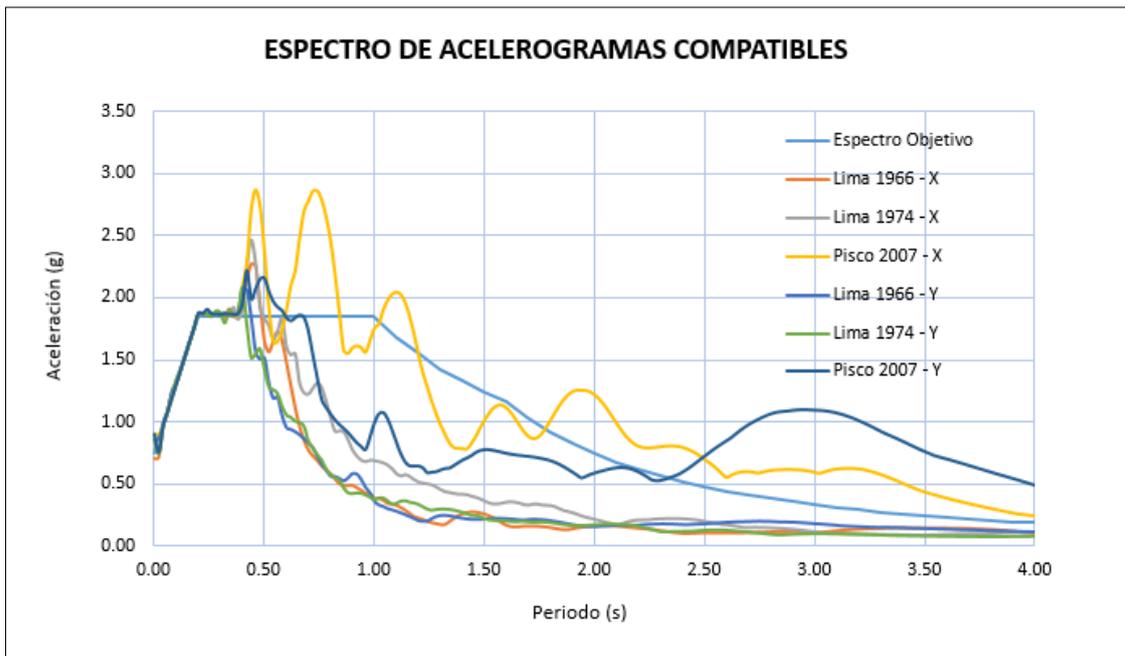
En las ilustraciones anteriores, se tiene un espectro objetivo, que es el espectro elástico con un $R = 1$, con el cual se va a escalar los 3 registros sísmicos utilizados. La normativa señala que el promedio de los 3 registros sísmicos debe superar e igualar al espectro elástico en el rango de $0.2 T_{\min}$ a $1.5 T_{\max}$. Es por ello que, en la presente tesis se va a compatibilizar en el siguiente rango de periodos.

Tabla 19: Rango de períodos para el espectro compatible – módulo 01

PERIODOS	
$T_X = 0.266 \text{ s}$	$T_Y = 0.142 \text{ s}$
Rango a Compatibilizar	
$0.2 T_{\min} = 0.0284 \text{ s}$	$1.50 T_{\max} = 0.399 \text{ s}$

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 48: Espectro de respuesta de acelerogramas compatibles – módulo 01

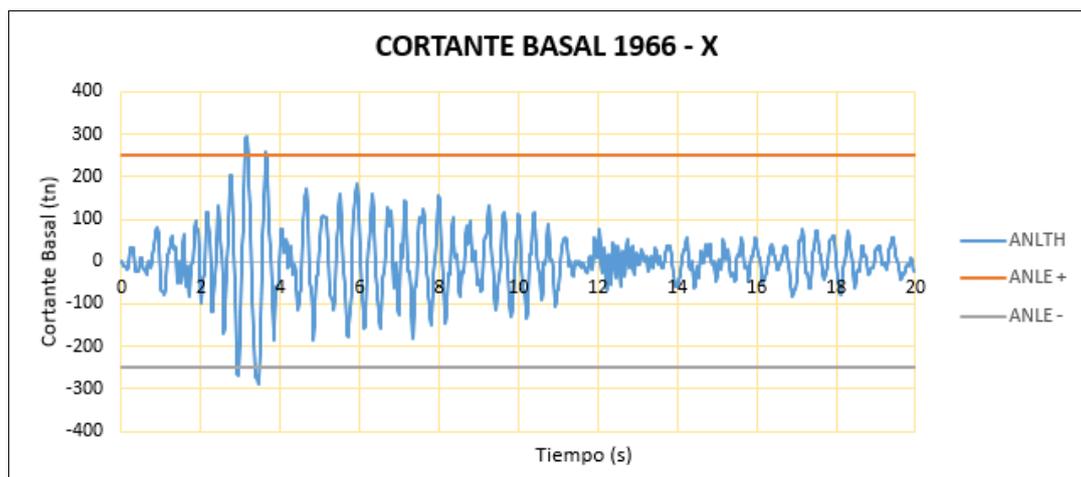


Fuente: Elaboración propia

Resultados del análisis no lineal dinámico tiempo historia

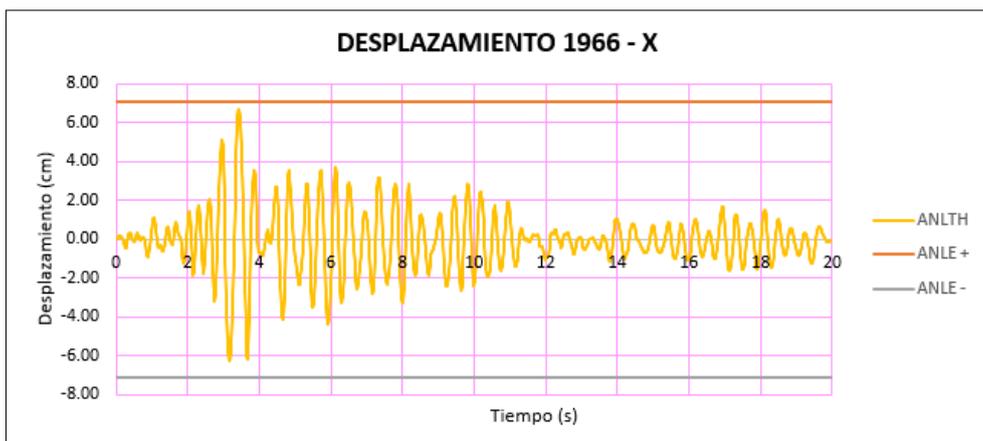
- a) Sismo Lima 1966
 - Dirección X

Ilustración 49: Cortante basal - sismo Lima 1966 - dirección X – módulo 01



Fuente: Elaboración propia

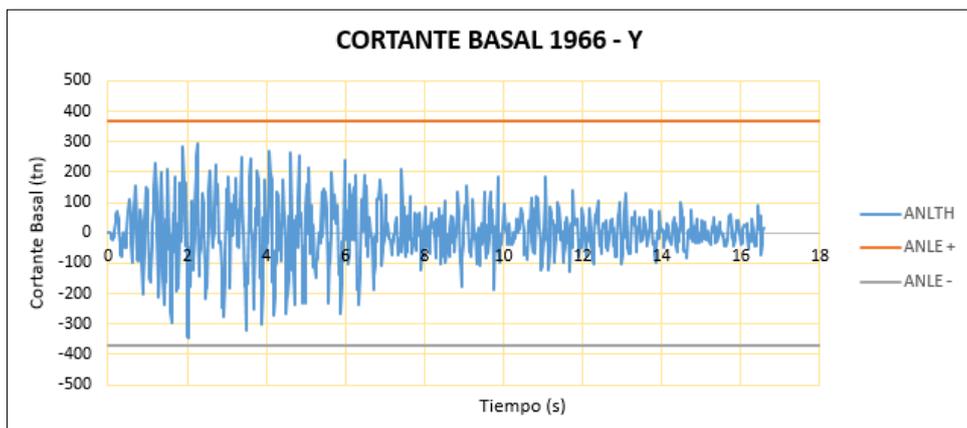
Ilustración 50: Desplazamiento - sismo Lima 1966 - dirección X – módulo 01



Fuente: Elaboración propia

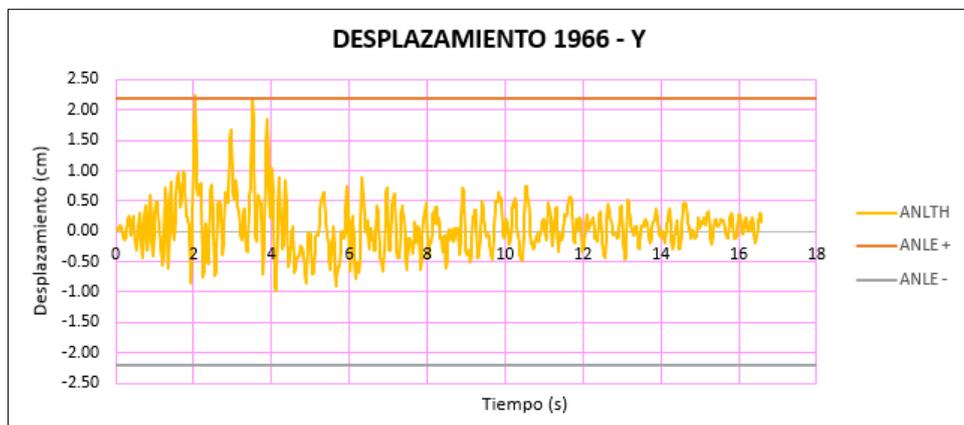
➤ Dirección Y

Ilustración 51: Cortante basal - sismo Lima 1966 - dirección Y – módulo 01



Fuente: Elaboración propia

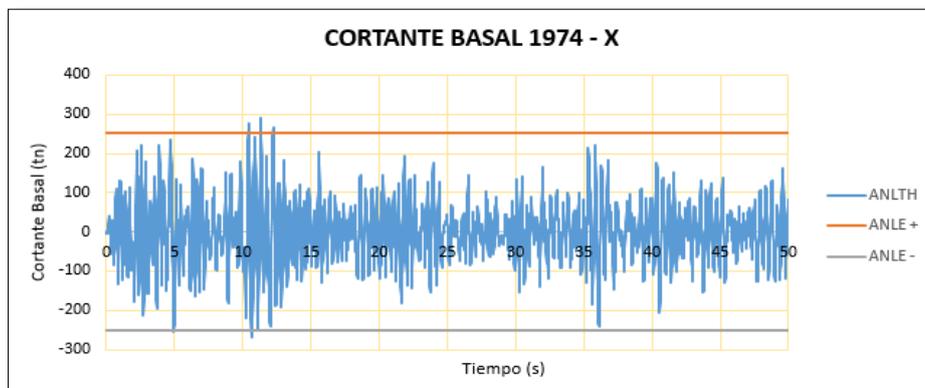
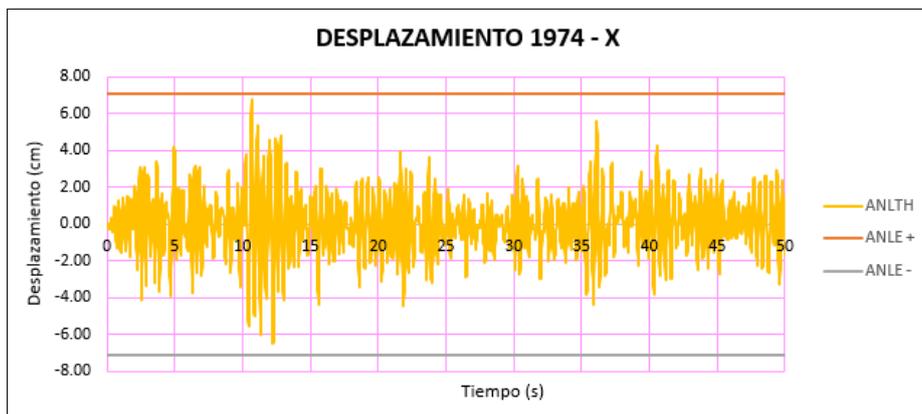
Ilustración 52: Desplazamiento - sismo Lima 1966 - dirección Y – módulo 01



Fuente: Elaboración propia

b) Sismo Lima 1974

➤ Dirección X

Ilustración 53: Cortante basal - sismo Lima 1974 – dirección X – módulo 01*Fuente: Elaboración propia**Ilustración 54: Desplazamiento – sismo Lima 1974 – dirección X – módulo 01**Fuente: Elaboración propia*

➤ Dirección Y

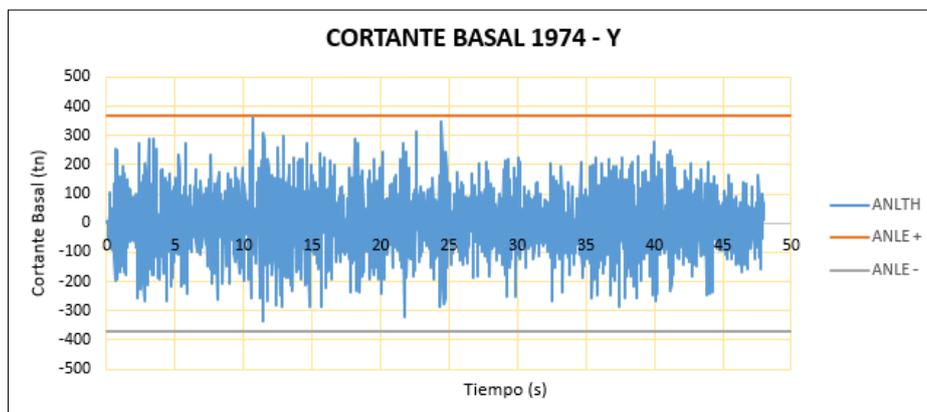
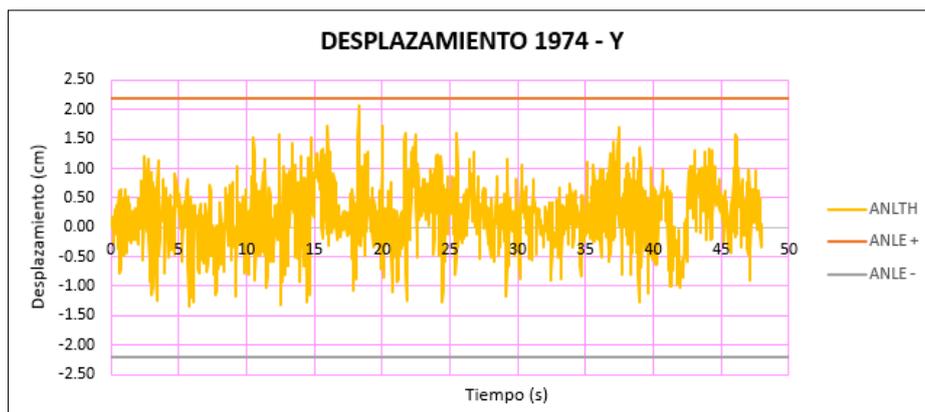
Ilustración 55: Cortante basal - sismo Lima 1974 - dirección Y – módulo 01*Fuente: Elaboración propia*

Ilustración 56: Desplazamiento - sismo Lima 1974 – dirección Y – módulo 01

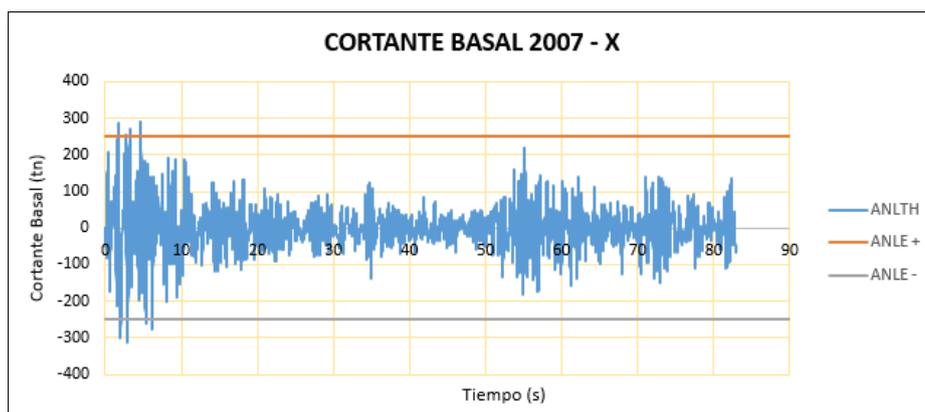


Fuente: Elaboración propia

c) Sismo Pisco 2007

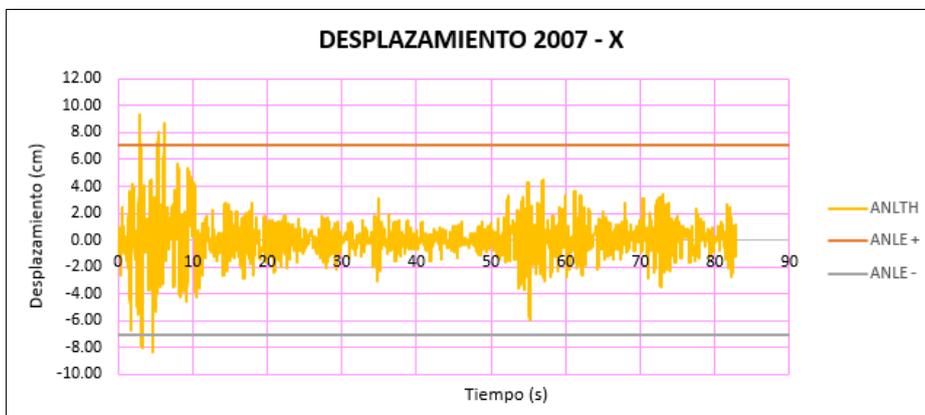
➤ Dirección X

Ilustración 57: Cortante basal - sismo Pisco 2007 - dirección X – módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 58: Desplazamiento - sismo Pisco 2007 - dirección X – módulo 01



Fuente: Elaboración propia

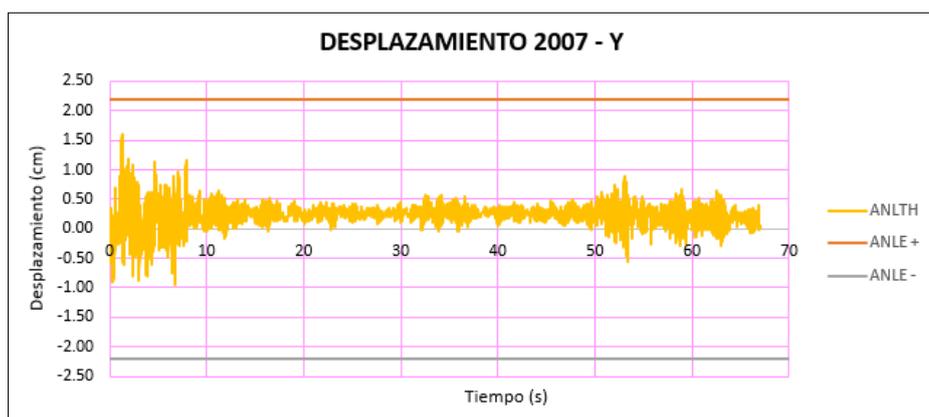
➤ Dirección Y

Ilustración 59: Cortante basal - sismo Pisco 2007 - dirección Y – módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 60: Desplazamiento - sismo Pisco 2007 - dirección Y – módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Tabla 20: Cortante y desplazamiento - análisis no lineal dinámico tiempo historia - dirección X – módulo 01

DIRECCIÓN X-X		
ANALISIS	CORTANTE BASAL MAXIMO (tn)	DESPLAZAMIENTO MAXIMO (cm)
ANLTH - LIMA 1966 - X	275.06	6.71
ANLTH - LIMA 1974 - X	247.75	6.75
ANLTH - PISCO 2007 - X	279.94	9.37
ANLE	250.90	7.10
MÁXIMO	279.94	9.37
PROMEDIO	267.58	7.61

Fuente: Elaboración propia

Tabla 21: Cortante y desplazamiento - análisis no lineal dinámico tiempo historia - dirección Y – módulo 01

DIRECCIÓN Y-Y		
ANALISIS	CORTANTE BASAL MAXIMO (tn)	DESPLAZAMIENTO MAXIMO (cm)
ANLTH - LIMA 1966 - Y	343.72	1.75
ANLTH - LIMA 1974 - Y	229.58	1.99
ANLTH - PISCO 2007 - Y	396.63	1.47
ANLE	369.00	2.20
MÁXIMO	396.63	1.99
PROMEDIO	323.31	1.74

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 20 y 21 se presenta los valores máximos de cortante y desplazamiento en cada dirección de estudio. A continuación, se muestran los resultados de derivas en cada entrepiso y para cada registro sísmico.

Tabla 22: Derivas - análisis no lineal dinámico tiempo historia – módulo 01

Piso	DERIVA X-X		
	1966	1974	2007
Piso 1	0.011	0.010	0.015
Piso 2	0.010	0.011	0.014

Piso	DERIVA Y-Y		
	1966	1974	2007
Piso 1	0.004	0.004	0.004
Piso 2	0.003	0.004	0.002

Fuente: Elaboración propia

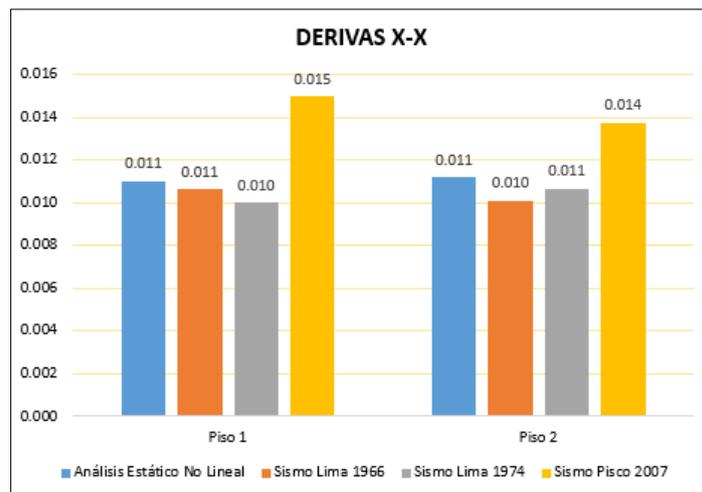
Comparación de resultados de los análisis no lineales

Tabla 23: Derivas del análisis no lineal – dirección X – módulo 01

DERIVAS X-X				
Piso	Análisis Estático No Lineal	Sismo Lima 1966	Sismo Lima 1974	Sismo Pisco 2007
Piso 1	0.011	0.011	0.010	0.015
Piso 2	0.011	0.010	0.011	0.014

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 61: Comparación de derivas de los análisis no lineales - dirección X - módulo 01



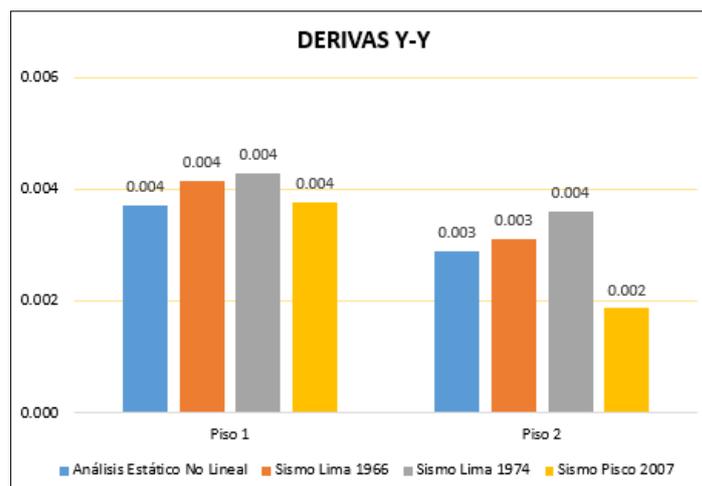
Fuente: Elaboración propia

Tabla 24: Derivas del análisis no lineal - dirección Y - módulo 01

DERIVAS Y-Y				
Piso	Análisis Estático No Lineal	Sismo Lima 1966	Sismo Lima 1974	Sismo Pisco 2007
Piso 1	0.004	0.004	0.004	0.004
Piso 2	0.003	0.003	0.004	0.002

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 62: Comparación de derivas de los análisis no lineales - dirección Y - módulo 01



Fuente: Elaboración propia

Las ilustraciones anteriores muestran que las derivas tanto del análisis estático y dinámico no lineal son muy similares.

Módulo 02 de la Institución Educativa

El módulo en estudio presenta un área techada de 201.54 m² y consta de dos pisos. En el primer piso funciona como aulas taller y en el segundo piso presenta ambientes como biblioteca, centro de archivos y centro de atención. La altura del primer piso es de 3.35 m y el segundo piso es de 3.20 m. En la dirección X el sistema estructural es albañilería confinada y en la dirección Y es muros de concreto armado. Además, presenta una losa aligerada armada en la dirección Y con un espesor de 0.20 m. Con el objetivo de brindar una buena iluminación, este módulo presenta ventanas con un ancho de 2.35 m, altura de 1.00 m y alfeizar de 1.80 m.

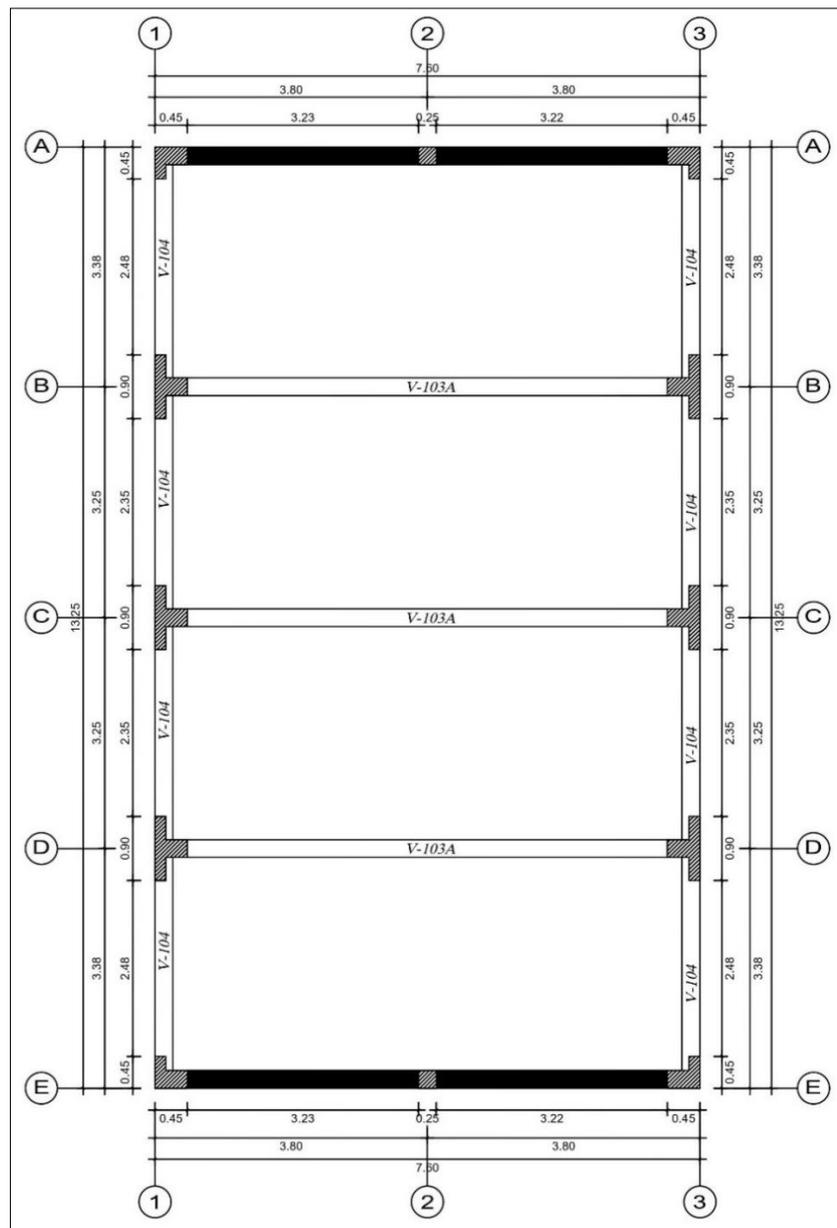
Ilustración 63: Fachada interior del módulo 02 de la Institución Educativa



Fuente: Elaboración propia

En la dirección X se observa los muros portantes de albañilería con un espesor de 0.25 m. Cada muro presenta sus elementos de confinamiento, tanto columnas como vigas soleras. Las vigas soleras tienen una sección de 0.25 x 0.30 m y las columnas de confinamiento presentan forma cuadrada y en L. Además, existen vigas peraltadas con una sección de 0.25 x 0.75 m, las cuales soportan el peso de la losa. La dirección Y está formada por muros de concreto armado con un espesor de 0.15 m y vigas peraltas con una sección de 0.25 x 0.40 m

Ilustración 64: Plano estructural del módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Para el análisis de este módulo se va a tener en cuenta las características y propiedades mecánicas de los materiales tal como se describe en la Tabla 5.

Metrado de cargas

La carga de tabiquería en las vigas adquiere un valor de:

$$\text{Alfeizar: } w = 0.15 * 1.80 * 1350 = 364.5 \text{ kg/m}$$

La Norma E.020 considera una sobrecarga de 350 kg/m^2 en talleres, 300 kg/m^2 en bibliotecas y 100 kg/m^2 para techos.

Tabla 25: Carga muerta módulo 02

Carga Muerta	
Losa aligerada e = 0.20 m	300 kg/m ²
Acabados	100 kg/m ²
Alfeizar	364.5 kg/m

Fuente: Elaboración propia

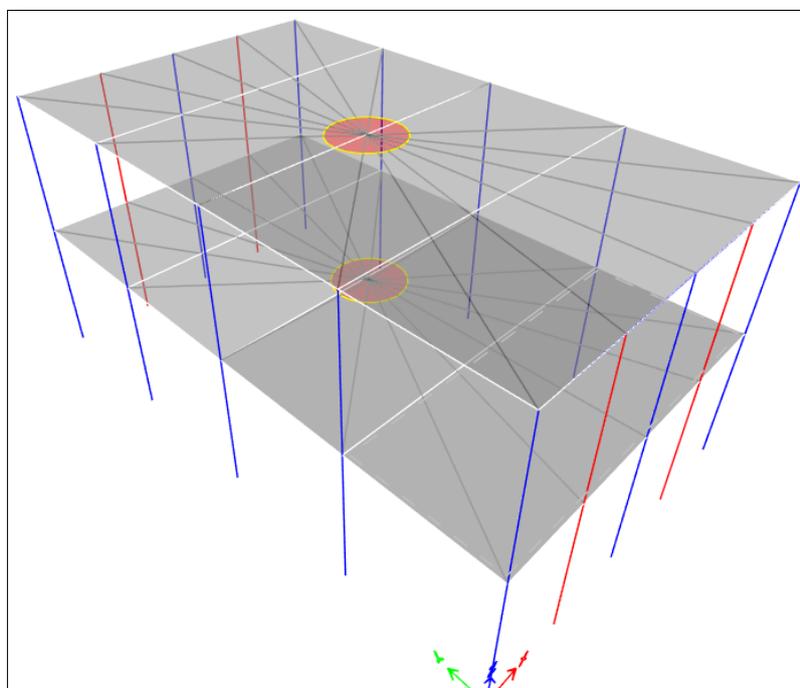
Tabla 26: Carga viva módulo 02

Carga Viva	
Losa - Biblioteca	300 kg/m ²
Losa - Techo	100 kg/m ²

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia en la Ilustración 65, al modelo se le asignó diafragmas rígidos con la finalidad que todo trabaje en conjunto.

Ilustración 65: Diafragma rígido módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Análisis de fuerzas estáticas equivalentes

Tabla 27: Masa del módulo 02

TABLE: Centers of Mass and Rigidity			
Story	Diaphragm	Mass X	Mass Y
		tonf-s ² /m	tonf-s ² /m
Story1	D1	12.31	12.31
Story2	D2	7.21	7.21

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Peso Sismico} = m * g = (12.31 + 7.21) * 9.81 = 191.49 \text{ tn}$$

Tabla 28: Cálculo de la cortante basal módulo 02

Dirección X (Sistema Estructural de Albañilería Confinada)		Dirección Y (Sistema Estructural de Muros de Concreto Armado)	
Z =	0.45	Z =	0.45
U =	1.50	U =	1.50
S =	1.10	S =	1.10
T _p =	1.00	T _p =	1.00
T _L =	1.60	T _L =	1.60
T =	0.14	T =	0.22
C =	2.50	C =	2.50
I _a =	1.00	I _a =	1.00
I _p =	1.00	I _p =	1.00
R _o =	3	R _o =	6
R =	3	R =	6
ZUCS/R =	0.61875	ZUCS/R =	0.30938
Cortante Basal X =	118.49 tn	Cortante Basal Y =	59.24 tn

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 28, se tiene una cortante basal de 118.49 tn en la dirección X y 59.24 tn en la dirección Y.

Análisis dinámico modal espectral

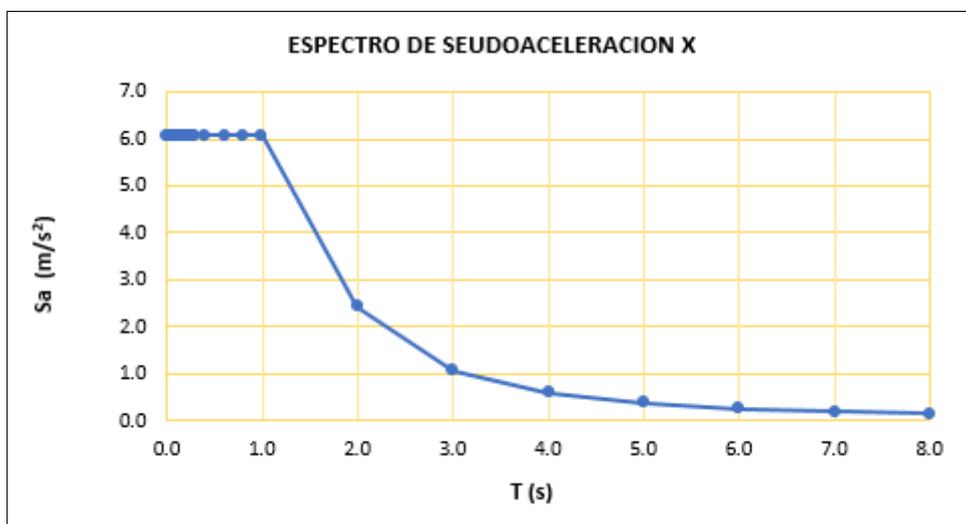
Para el análisis dinámico modal espectral se va a definir un espectro de pseudo aceleraciones tanto para la dirección X de albañilería confinada y para la dirección Y de muros de concreto armado.

Tabla 29: Datos del espectro de pseudo aceleración X - módulo 02

T	C	Sa X-X (m/s ²)
0.00	2.500	6.0699
0.02	2.500	6.0699
0.04	2.500	6.0699
0.06	2.500	6.0699
0.08	2.500	6.0699
0.10	2.500	6.0699
0.12	2.500	6.0699
0.14	2.500	6.0699
0.16	2.500	6.0699
0.18	2.500	6.0699
0.20	2.500	6.0699
0.22	2.500	6.0699
0.24	2.500	6.0699
0.26	2.500	6.0699
0.28	2.500	6.0699
0.30	2.500	6.0699
0.40	2.500	6.0699
0.60	2.500	6.0699
0.80	2.500	6.0699
1.00	2.500	6.0699
2.00	1.000	2.4280
3.00	0.444	1.0791
4.00	0.250	0.6070
5.00	0.160	0.3885
6.00	0.111	0.2698
7.00	0.082	0.1982
8.00	0.063	0.1517

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 66: Espectro de pseudo aceleración X - módulo 02



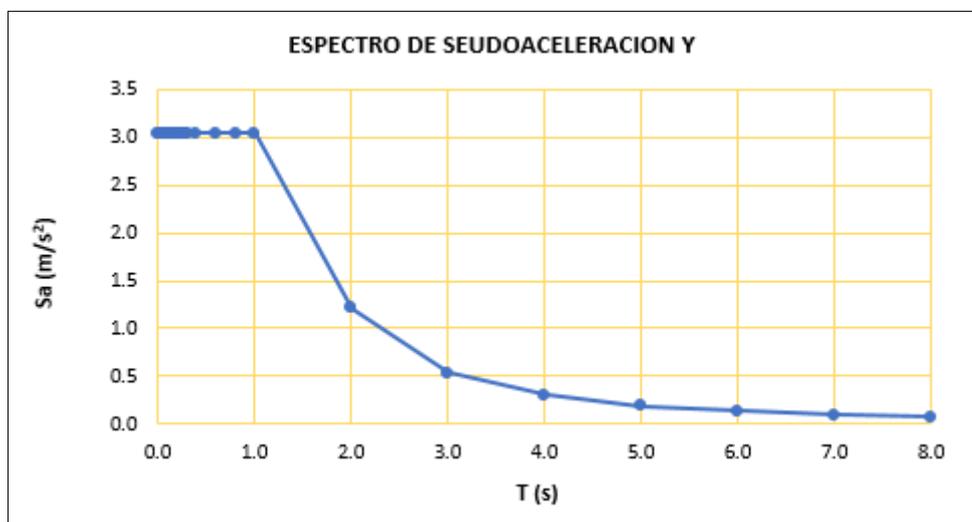
Fuente: Elaboración propia

Tabla 30: Datos del espectro de pseudo aceleración Y - módulo 02

T	C	Sa Y-Y (m/s ²)
0.00	2.500	3.0350
0.02	2.500	3.0350
0.04	2.500	3.0350
0.06	2.500	3.0350
0.08	2.500	3.0350
0.10	2.500	3.0350
0.12	2.500	3.0350
0.14	2.500	3.0350
0.16	2.500	3.0350
0.18	2.500	3.0350
0.20	2.500	3.0350
0.22	2.500	3.0350
0.24	2.500	3.0350
0.26	2.500	3.0350
0.28	2.500	3.0350
0.30	2.500	3.0350
0.40	2.500	3.0350
0.60	2.500	3.0350
0.80	2.500	3.0350
1.00	2.500	3.0350
2.00	1.000	1.2140
3.00	0.444	0.5396
4.00	0.250	0.3035
5.00	0.160	0.1942
6.00	0.111	0.1349
7.00	0.082	0.0991
8.00	0.063	0.0759

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 67: Espectro de pseudo aceleración Y - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Períodos y participación modal

Como se muestra en la Tabla 31 y 32, la participación modal dinámica llega al 99.98% en X y al 99.92 % en Y, superando lo que indica la Norma E.030. El primer modo de vibración actúa en la dirección Y, con un periodo de 0.223 s y masa participativa del 86.1 %. El segundo modo de vibración actúa en la dirección X, con un periodo de 0.142 y masa participativa del 81.6 %.

Tabla 31: Participación modal - módulo 02

Participación Modal				
Case	ItemType	Item	Static	Dynamic
			%	%
Modal	Acceleration	UX	100	99.98
Modal	Acceleration	UY	100	99.92
Modal	Acceleration	UZ	0	0

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32: Períodos y participación modal - módulo 02

Periodo y Participación Modal								
Case	Mode	Period sec	UX	UY	UZ	SumUX	SumUY	SumUZ
Modal	1	0.223	0.000	0.861	0	0.000	0.861	0
Modal	2	0.142	0.816	0.000	0	0.816	0.861	0
Modal	3	0.126	0.011	0.000	0	0.827	0.861	0
Modal	4	0.07	0.000	0.139	0	0.827	0.999	0
Modal	5	0.044	0.173	0.000	0	1.000	0.999	0
Modal	6	0.038	0.000	0.000	0	1.000	0.999	0

Fuente: Elaboración propia

Control de distorsiones

Tabla 33: Control de distorsiones módulo 02

Dirección X						
Piso	Altura (cm)	Desplazamiento Máximo	Desplazamiento Real Absoluto	Desplazamiento Real Relativo	Deriva	Verificación
Piso 2	320	0.4849	1.091	0.6500	0.0020	SI CUMPLE
Piso 1	335	0.1960	0.441	0.4410	0.0013	SI CUMPLE

Dirección Y						
Piso	Altura (cm)	Desplazamiento Máximo	Desplazamiento Real Absoluto	Desplazamiento Real Relativo	Deriva	Verificación
Piso 2	320	0.5120	2.304	1.2582	0.0039	SI CUMPLE
Piso 1	335	0.2324	1.0458	1.0458	0.0031	SI CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

La normativa señala una distorsión de 0.005 para el sistema estructural de Albañilería confinada y 0.007 para el sistema de muros de concreto armado. Como se muestra en la Tabla 33, las derivas no superan lo que indica la Norma.

Verificación de irregularidades

a) Irregularidad en altura

Tabla 34: Irregularidad de piso blando - módulo 02

Dirección X-X						
Piso	Cortante (tn)	Desp. Abs (m)	Desp. Relativo (m)	Rigidez (tn/m)	Verificación 1	
Piso 1	101.54	0.0017	0.0017	61130.40	2.48	REGULAR
Piso 2	59.51	0.0041	0.0024	24639.88		

Dirección Y-Y						
Piso	Cortante (tn)	Desp. Abs (m)	Desp. Relativo (m)	Rigidez (tn/m)	Verificación 1	
Piso 1	52.76	0.0023	0.0023	23000.35	2.13	REGULAR
Piso 2	29.74	0.0050	0.0028	10813.24		

Fuente: Elaboración propia

La estructura es regular en altura, ya que la rigidez del primer piso no es menor del 70% de la rigidez del segundo piso.

b) Irregularidad en planta

Tabla 35: Irregularidad torsional - módulo 02

Dirección X-X												
Piso	Desp-abs 1 (cm)	Desp-abs 2 (cm)	Desp-abs 3 (cm)	Desp-abs 4 (cm)	Desp-rel 1 (cm)	Desp-rel 2 (cm)	Desp-rel 3 (cm)	Desp-rel 4 (cm)	Max - Desp (cm)	Prom-Despl (cm)	Verificación	
Piso 1	0.1711	0.1711	0.196	0.196	0.17	0.17	0.20	0.20	0.20	0.18	1.068	REGULAR
Piso 2	0.4146	0.4146	0.4849	0.4849	0.24	0.24	0.29	0.29	0.29	0.27	1.085	REGULAR

Dirección Y-Y												
Piso	Desp-abs 1 (cm)	Desp-abs 2 (cm)	Desp-abs 3 (cm)	Desp-abs 4 (cm)	Desp-rel 1 (cm)	Desp-rel 2 (cm)	Desp-rel 3 (cm)	Desp-rel 4 (cm)	Max - Desp (cm)	Prom-Despl (cm)	Verificación	
Piso 1	0.2324	0.2323	0.2324	0.2323	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	1.000	REGULAR
Piso 2	0.512	0.5117	0.512	0.5117	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	1.000	REGULAR

Fuente: Elaboración propia

La estructura es regular en planta, ya que el desplazamiento máximo no supera el 1.30 veces el desplazamiento promedio.

Fuerza cortante mínima

Tabla 36: Fuerza cortante mínima - módulo 02

Dirección X		Dirección Y	
VXE	118.49 Tn	VYE	59.24 Tn
0.8 VXE=	94.79 Tn	0.8 VYE=	47.40 Tn
VXD =	101.54 Tn	VYD =	52.76 Tn
FC =	0.934	FC =	0.898

Fuente: Elaboración propia

Verificación del sistema estructural de albañilería confinada

a) Densidad de muros

Ilustración 68: Densidad mínima de muros portantes - módulo 02

EJE X			
Muro	Longitud (m)	Espesor (m)	Longitud x Espesor
MX1	7.6	0.25	1.90
MX2	7.6	0.25	1.90
			3.80

Area en Planta : 100.7 m²
 Z : 0.45
 U : 1.5
 S : 1.1
 N : 2

$$\frac{\sum \text{Longitud} \times \text{Espesor}}{\text{Area de planta}} \geq \frac{Z * U * S * N}{56}$$

0.038 ≥ 0.027
SI CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 68, nos damos cuenta que la estructura cumple con la densidad mínima de muros portantes de albañilería.

b) Verificación de esfuerzos axiales

En la Ilustración 69, los dos muros portantes presentan esfuerzos axiales inferiores a lo que indica la Norma E.070 Albañilería, con ello podemos decir que los muros no fallarán por pandeo o por reducción de ductilidad.

Ilustración 69: Cálculo del esfuerzo axial máximo - módulo 02

$f'm = 65 \text{ kg/cm}^2$	$h = 305 \text{ cm}$	$\frac{P_m}{L * t} \leq 0.2 * f'm * \left[1 - \left(\frac{h}{35 * t} \right)^2 \right] \leq 0.15 * f'm$					
ESFUERZO AXIAL MAXIMO- PISO 1							
MURO	Pm (kg)	L (cm)	t (cm)	$\sigma_m \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$0.2 * f'm * \left[1 - \left(\frac{h}{35 * t} \right)^2 \right]$	$0.15 * f'm$	Verificación
MY1	48180.27	760	25	2.536	11.42	9.75	SI CUMPLE
MY2	47494.24	760	25	2.500	11.42	9.75	SI CUMPLE
$f'm = 65 \text{ kg/cm}^2$	$h = 290 \text{ cm}$	$\frac{P_m}{L * t} \leq 0.2 * f'm * \left[1 - \left(\frac{h}{35 * t} \right)^2 \right] \leq 0.15 * f'm$					
ESFUERZO AXIAL MAXIMO - PISO 2							
MURO	Pm (kg)	L (cm)	t (cm)	$\sigma_m \text{ (kg/cm}^2\text{)}$	$0.2 * f'm * \left[1 - \left(\frac{h}{35 * t} \right)^2 \right]$	$0.15 * f'm$	Verificación
MY1	21025.19	760	25	1.107	11.57	9.75	SI CUMPLE
MY2	21076.85	760	25	1.109	11.42	9.75	SI CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

c) Control de fisuración

Ilustración 70: Control de fisuración - módulo 02

$v'm = 8.1 \text{ kg/cm}^2$	$V_e \leq 0.55 * V_m$	$\frac{1}{3} \leq \alpha = \frac{V_e * L}{M_e} \leq 1$							
$V_m = 0.5 * v'm * \alpha * t * L + 0.23 * P_g$									
CONTROL DE FISURACION - PISO 1									
MURO	L (m)	t (m)	Pg (tn)	Ve (tn)	Me (tn.m)	α	Vm (tn)	0.55Vm	Verificación
MX1	7.6	0.25	45.05	24.82	115.35	1.0	87.31	48.02	NO FISURADO
MX2	7.6	0.25	44.98	22.65	106.72	1.0	87.29	48.01	NO FISURADO
Donde									
Pg : Carga de gravedad con 50% de carga viva									
Ve : Fuerza cortante del muro producida por el sismo moderado									
Me : Momento flector del muro producida por el sismo moderado									
α : Factor de reducción de resistencia al corte por efectos de esbeltez									
CONTROL DE FISURACION - PISO 2									
MURO	L (m)	t (m)	Pg (tn)	Ve (tn)	Me (tn.m)	α	Vm (tn)	0.55Vm	Verificación
MX1	7.6	0.25	20.39	11.96	38.57	1.0	81.64	44.90	NO FISURADO
MX2	7.6	0.25	20.43	11.07	36.33	1.0	81.65	44.91	NO FISURADO

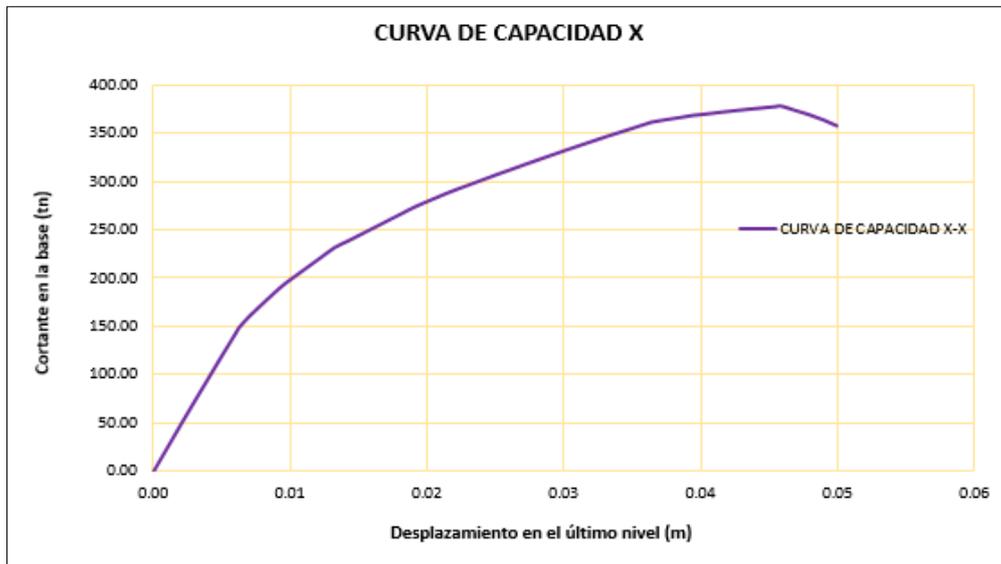
Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 70, el 55% de la resistencia al corte de los muros de albañilería es mayor a la cortante producida por el sismo moderado, lo que nos indica que los muros no se fisuran.

Análisis estático no lineal

Curva de capacidad de la estructura

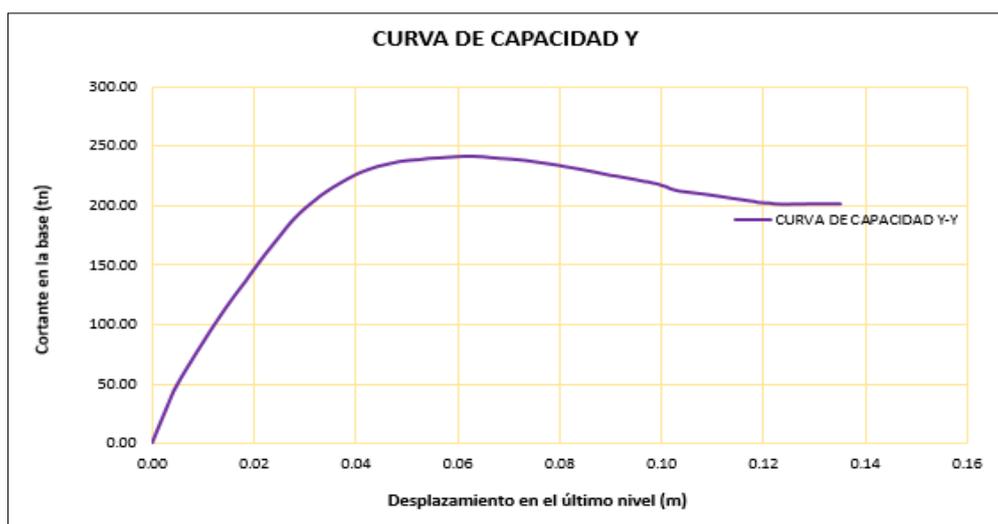
Ilustración 71: Curva de capacidad dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

La curva de capacidad en X presenta una linealidad al inicio, luego alcanza una cortante máxima de 377.85 tn con un desplazamiento de 0.046 m, y finalmente una cortante última de 357.48 tn con un desplazamiento de 0.050 m. La curva de capacidad en Y alcanza una cortante máxima de 240.87 tn con un desplazamiento de 0.061 m y por último una cortante de 201.019 tn con un desplazamiento de 0.135 m.

Ilustración 72: Curva de capacidad dirección Y - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Punto de desempeño

➤ Dirección X

El desplazamiento objetivo se calculará de la siguiente manera:

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * S_a * \frac{T_e^2}{4 * \pi^2} * g$$

$C_0 = 1.2$ (Factor de modificación para relacionar el desplazamiento de un sistema de un grado de libertad para el desplazamiento del techo con múltiples grados de libertad)

$a = 60$ (Factor dependiente del tipo de suelo)

$T_i = 0.142$ s (Periodo fundamental elástico del análisis dinámico)

$K_i = 24386.85$ tn/m (Rigidez lateral elástica de la estructura en la dirección X)

$K_e = 24235.20$ tn/m (Rigidez lateral efectiva obtenida de la curva bilineal)

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0.142 * \sqrt{\frac{24386.85}{24235.20}} = 0.142 \text{ s}$$

(Periodo fundamental efectivo en X)

$Z = 0.45$ (Factor de Zona)

$U = 1.50$ (Factor de uso)

$S = 1.10$ (Factor de suelo)

$T_P = 1.00$

$T_L = 1.60$

$C = 2.5$ $T < T_P$ (Factor de amplificación sísmica)

$R = 1.00$ (Coeficiente de reducción elástico)

$$S_a = \frac{Z * U * S * C}{R} = \frac{0.45 * 1.5 * 1.10 * 2.5}{1} = 1.856$$

$V_Y = 190$ tn (Límite elástico de la curva bilineal)

$W = 214.15$ tn (Peso Sísmico de la estructura)

$C_m = 1$ (Factor de masa participativa)

$$\mu_{strength} = \frac{1.856}{190/214.15} * 1 = 2.09$$

(Relación entre la demanda de resistencia elástica y el límite elástico)

$$C_1 = 1 + \frac{2.09 - 1}{60 * 0.142^2} = 1.90$$

(Factor de modificación que relaciona el desplazamiento máximo inelástico con el desplazamiento calculado elástico lineal)

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{2.09 - 1}{0.142} \right)^2 = 1.07$$

(Factor de modificación que representa el efecto de la forma de histéresis)

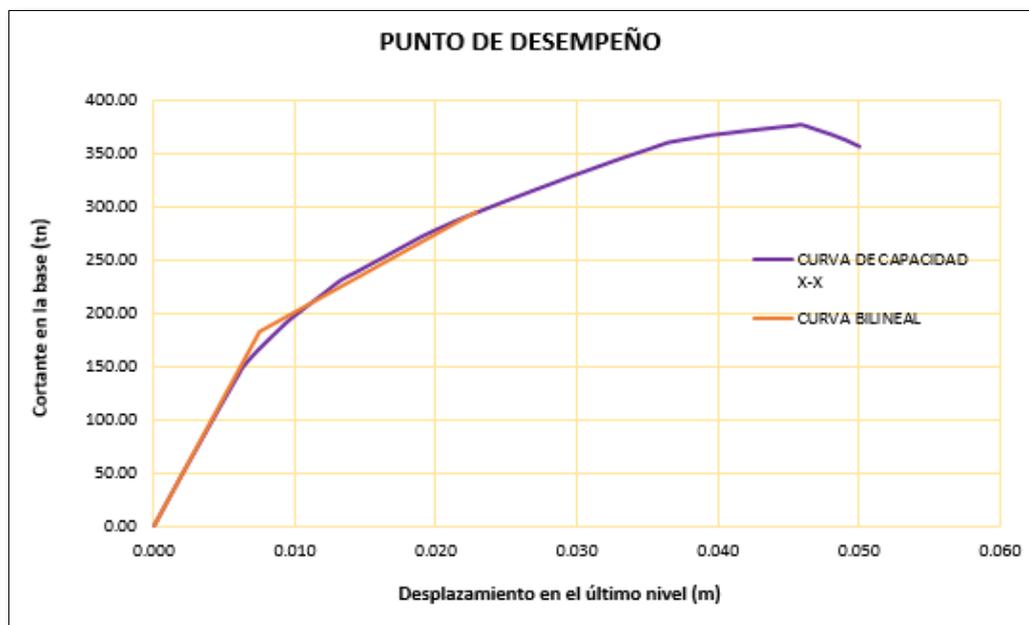
$$\delta_t = 1.2 * 1.90 * 1.07 * 1.856 * \frac{0.142^2}{4 * \pi^2} * 981 = 2.269 \text{ cm}$$

Tabla 37: Datos para la curva bilineal dirección X - módulo 02

Desplazamiento (m)	Cortante (tn)
0.00	0.00
0.008	183.00
0.023	295.00

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 73: Punto de desempeño en la dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Por el método de los coeficientes el desplazamiento objetivo en la dirección X es 2.269 cm con una cortante de 295.00 tn, además se tiene un cortante límite elástico de la curva bilineal con un valor de 183 tn y un desplazamiento de 0.8 cm.

➤ **Dirección Y**

El desplazamiento objetivo se calculará de la siguiente manera:

$$\delta_t = C_0 * C_1 * C_2 * S_a * \frac{T_e^2}{4 * \pi^2} * g$$

$C_0 = 1.2$ (Factor de modificación para relacionar el desplazamiento de un sistema de un grado de libertad para el desplazamiento del techo con múltiples grados de libertad)

$a = 60$ (Factor dependiente del tipo de suelo)

$T_i = 0.223$ s (Periodo fundamental elástico del análisis dinámico)

$K_i = 10322.75$ tn/m (Rigidez lateral elástica de la estructura en la dirección Y)

$K_e = 7954.55$ tn/m (Rigidez lateral efectiva obtenida de la curva bilineal)

$$T_e = T_i * \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} = 0.223 * \sqrt{\frac{10322.75}{7954.55}} = 0.2540 \text{ s}$$

(Período fundamental efectivo en Y)

$Z = 0.45$ (Factor de Zona)

$U = 1.50$ (Factor de uso)

$S = 1.10$ (Factor de suelo)

$T_P = 1.00$

$T_L = 1.60$

$C = 2.5$ $T < T_P$ (Factor de amplificación sísmica)

$R = 1.00$ (Coeficiente de reducción elástico)

$$S_a = \frac{Z * U * S * C}{R} = \frac{0.45 * 1.5 * 1.10 * 2.5}{1} = 1.856$$

$V_Y = 175.00$ tn (Límite elástico de la curva bilineal)

$W = 214.15$ tn (Peso Sísmico de la estructura)

$C_m = 1$ (Factor de masa participativa)

$$\mu_{strength} = \frac{1.856}{175.00/214.15} * 1 = 2.271$$

(Relación entre la demanda de resistencia y el límite elástico)

$$C_1 = 1 + \frac{2.271 - 1}{60 * 0.2540^2} = 1.328$$

(Factor de modificación que relaciona el desplazamiento máximo inelástico con el desplazamiento calculado elástico lineal)

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{2.271 - 1}{0.2540} \right)^2 = 1.031$$

(Factor de modificación que representa el efecto de la forma de histéresis)

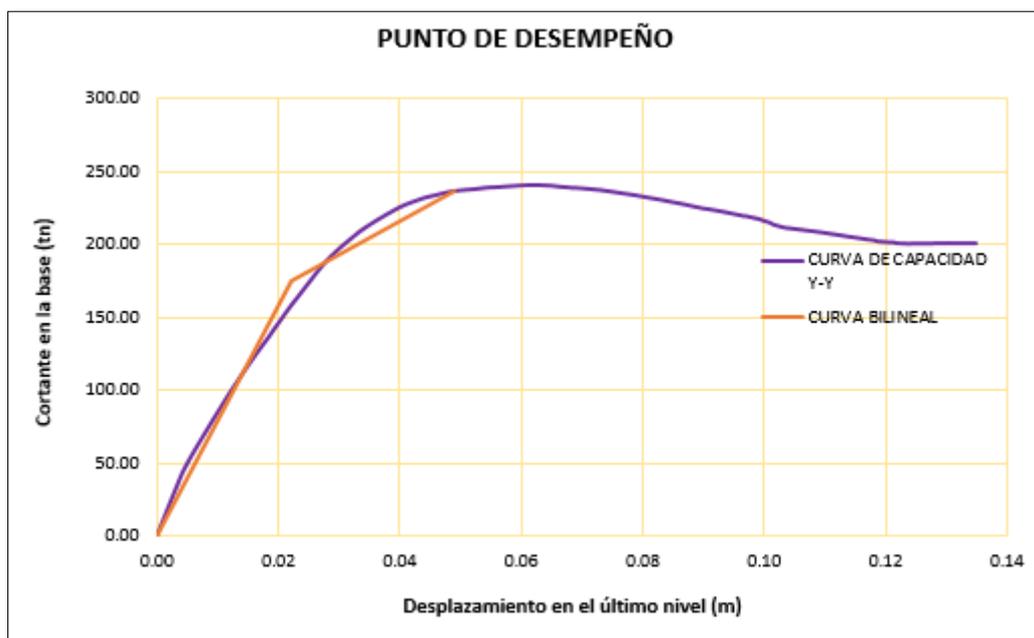
$$\delta_t = 1.2 * 1.328 * 1.031 * 1.856 * \frac{0.254^2}{4 * \pi^2} * 981 = 4.89 \text{ cm}$$

Tabla 38: Datos para la curva bilineal dirección Y - módulo 02

Desplazamiento (m)	Cortante (tn)
0.00	0.00
0.022	175.00
0.0489	236.50

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 74: Punto de desempeño en la dirección Y - módulo 02



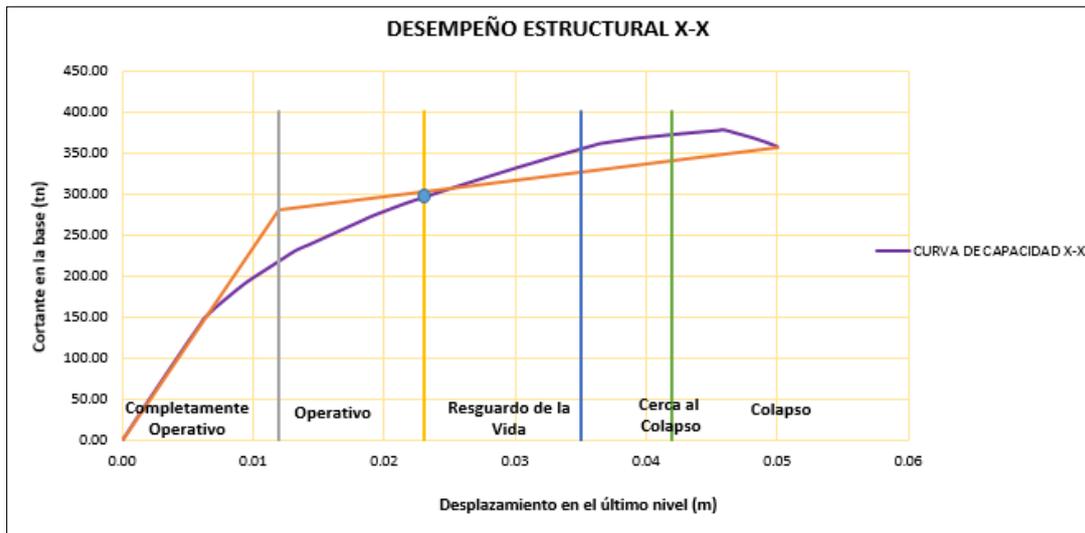
Fuente: Elaboración propia

Por el método de coeficientes el desplazamiento objetivo en la dirección Y es 4.89 cm con una cortante de 236.50 tn, además se tiene una cortante límite elástico de la curva bilineal con un valor de 175 tn y un desplazamiento de 2.2 cm.

Evaluación del desempeño sísmico

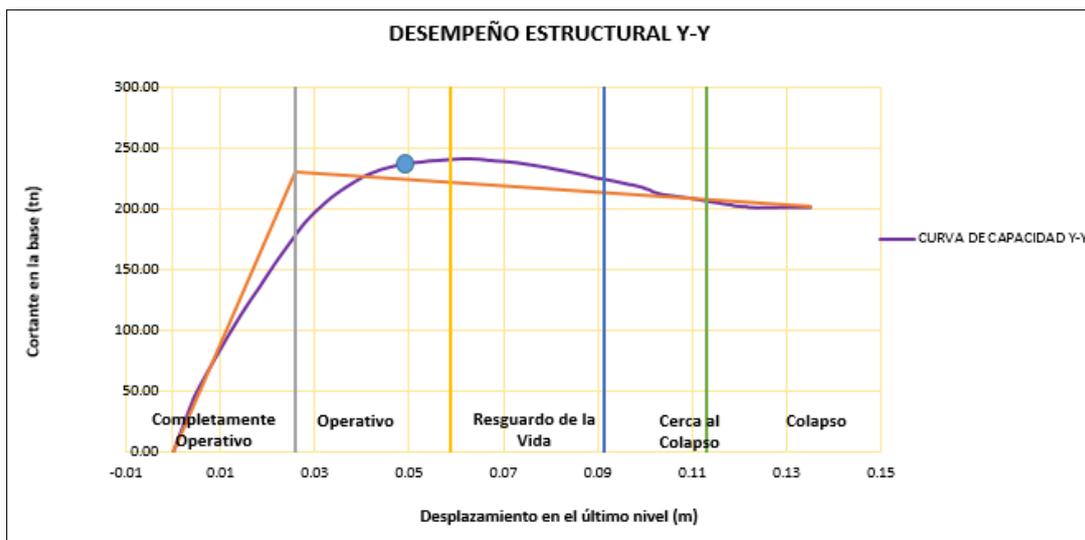
De acuerdo al SEAOC, la estructura se encuentra en operacional y resguardo de vida, teniendo sus elementos estructurales con pequeños daños y elementos no estructurales con daños moderados. Por lo tanto, se concluye que el módulo en estudio si cumple con los objetivos de la normativa peruana.

Ilustración 75: Desempeño estructural dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 76: Desempeño estructural dirección Y - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Análisis dinámico no lineal

Señales sísmicas compatibles con el espectro elástico

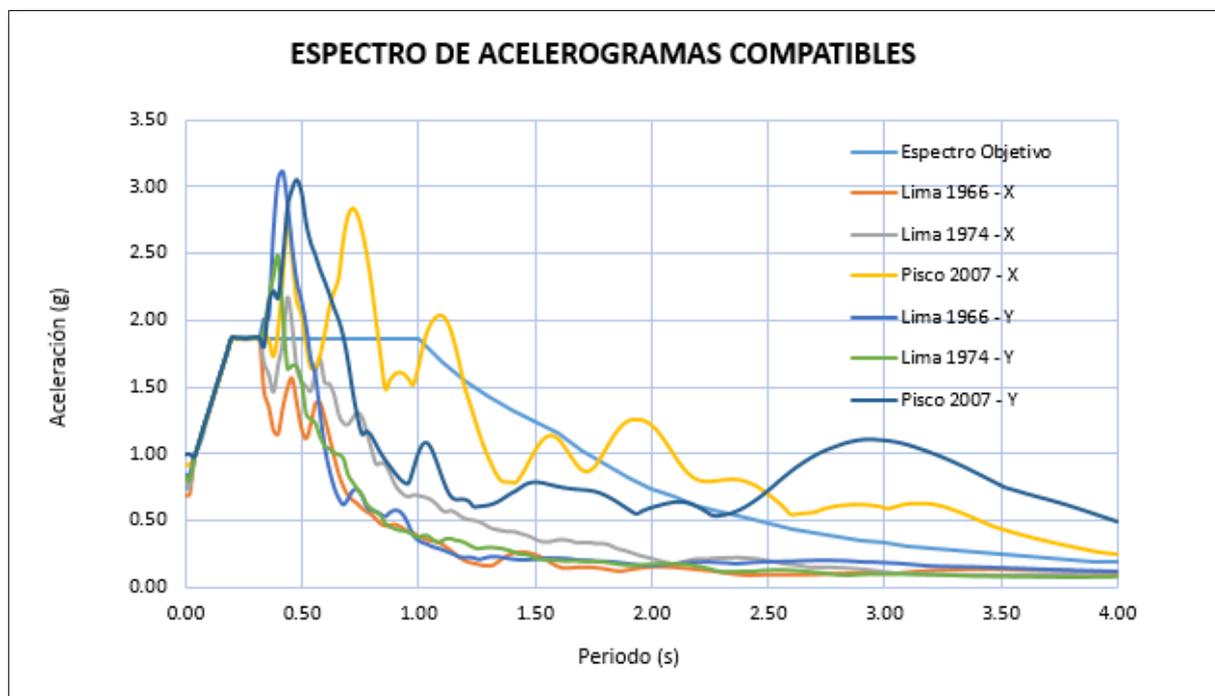
Los 3 registros sísmicos se deben compatibilizar con el espectro elástico en el rango de periodos 0.0284 s y 0.334 s. La Tabla 39 muestra el rango de periodos para el espectro compatible y la Ilustración 77 el Espectro de Respuesta de Acelerogramas Compatibles.

Tabla 39: Rango de periodos para el espectro compatible - módulo 02

PERIODOS	
$T_X = 0.142 \text{ s}$	$T_Y = 0.223 \text{ s}$
Rango a Compatibilizar	
$0.2 T_{\min} = 0.0284 \text{ s}$	$1.50 T_{\max} = 0.334 \text{ s}$

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 77: Espectro de respuesta de acelerogramas compatibles - módulo 02



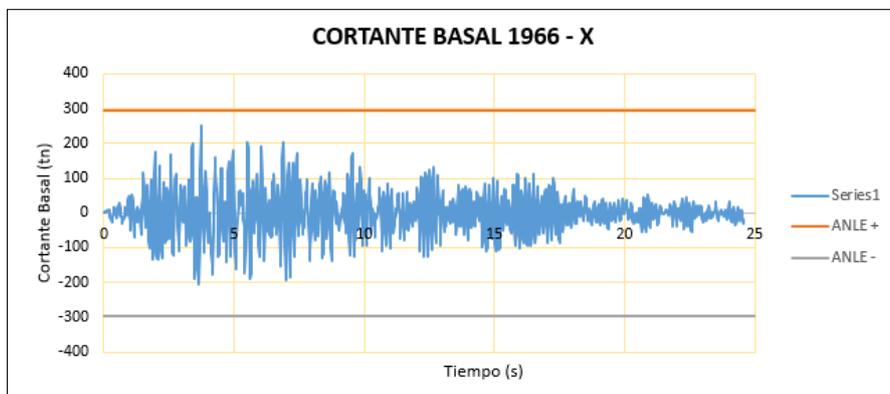
Fuente: Elaboración propia

Resultados del análisis no lineal dinámico tiempo historia

a) Sismo Lima 1966

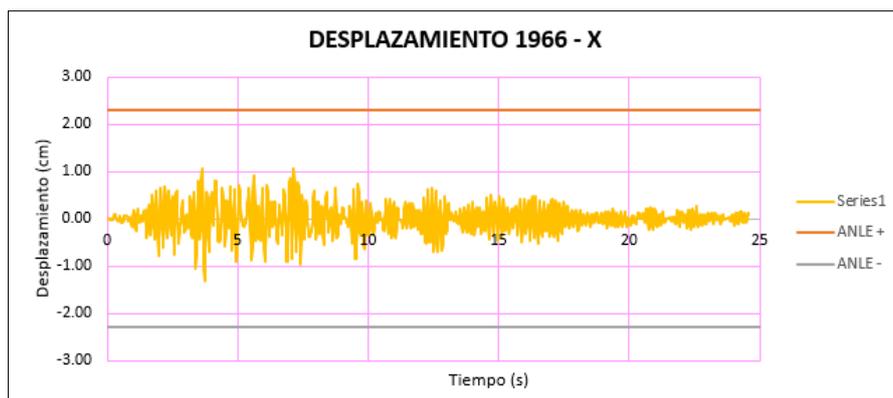
➤ **Dirección X**

Ilustración 78: Cortante basal - sismo lima 1966 - dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

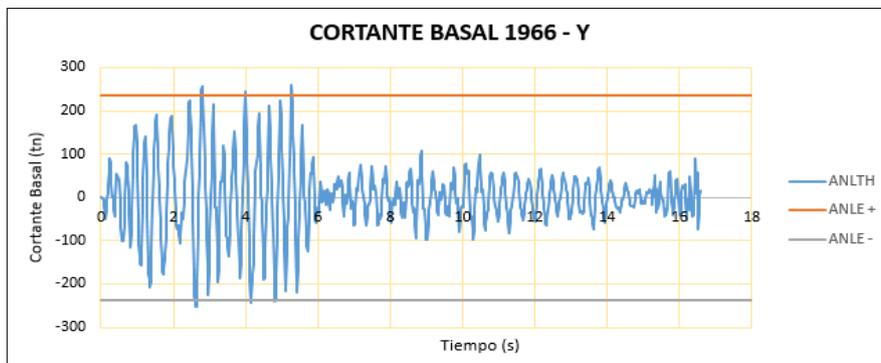
Ilustración 79: Desplazamiento - sismo lima 1966 - dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

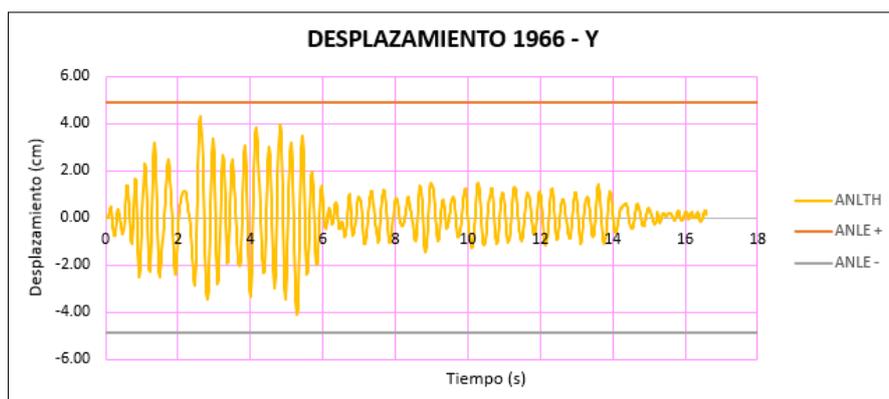
➤ **Dirección Y**

Ilustración 80: Cortante basal - sismo lima 1966 - dirección Y - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 81: Desplazamiento - sismo Lima 1966 - dirección Y - módulo 02

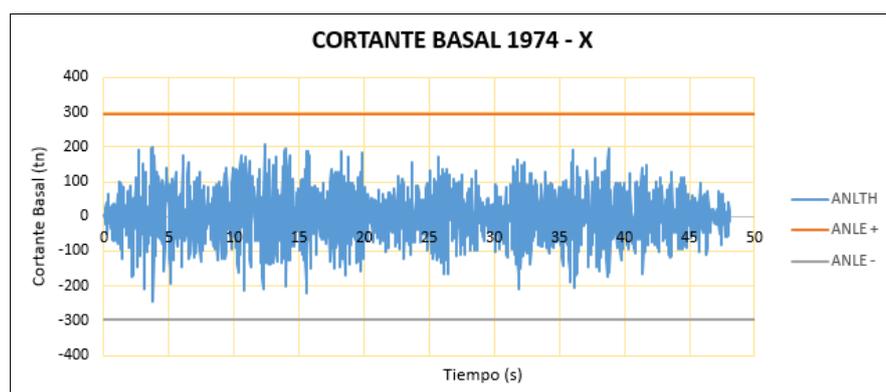


Fuente: Elaboración propia

b) Sismo Lima 1974

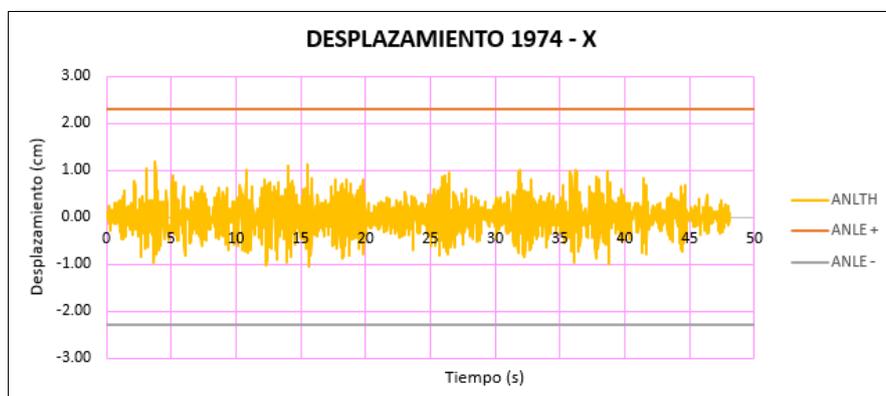
➤ Dirección X

Ilustración 82: Cortante basal - sismo Lima 1974 - dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

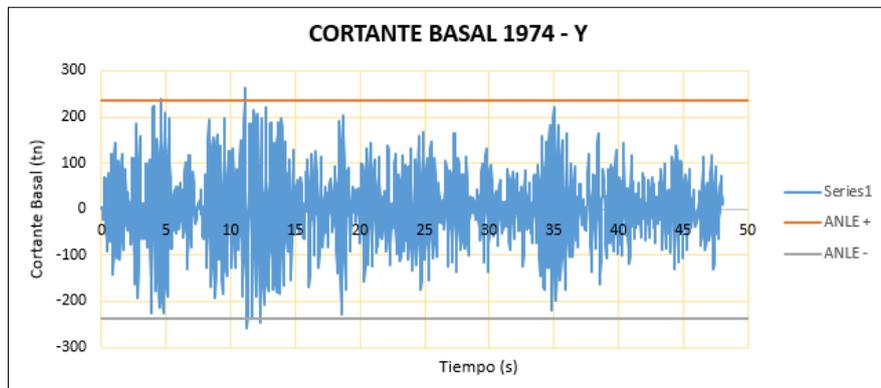
Ilustración 83: Desplazamiento - sismo Lima 1974 - dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

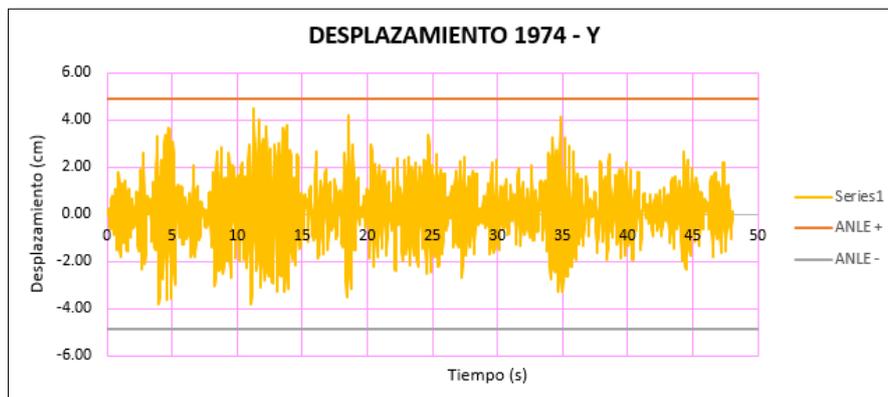
➤ Dirección Y

Ilustración 84: Cortante basal - sismo Lima 1974 - dirección Y - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 85: Desplazamiento - sismo Lima 1974 - dirección Y - módulo 02

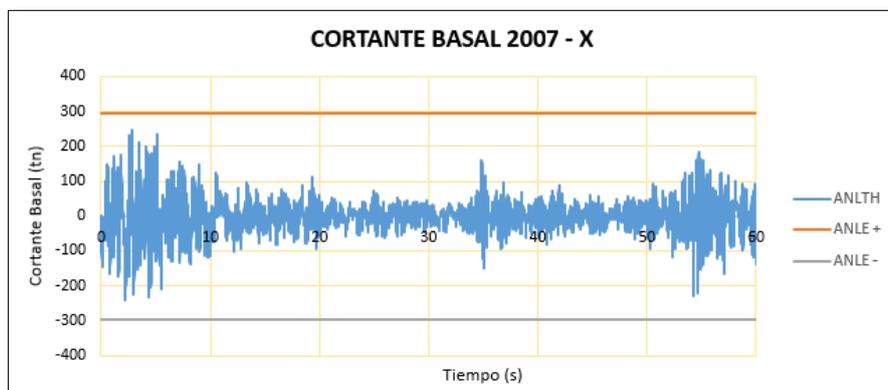


Fuente: Elaboración propia

c) **Sismo Pisco 2007**

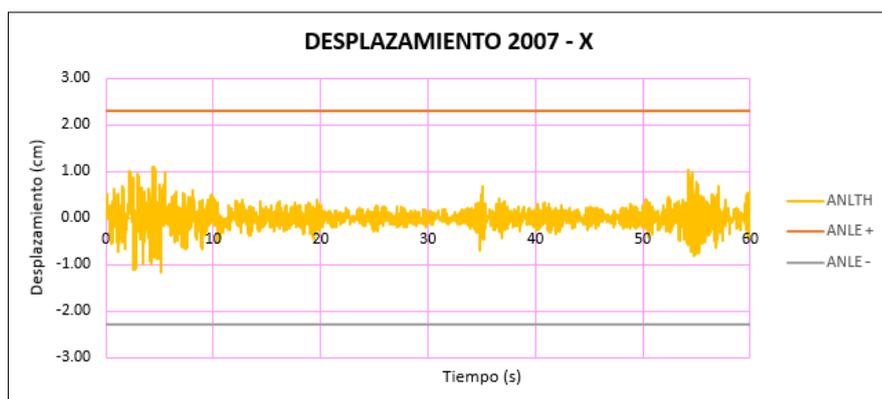
➤ Dirección X

Ilustración 86: Cortante basal - sismo Pisco 2007 - dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 87: Desplazamiento - sismo Pisco 2007 - dirección X - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

➤ Dirección Y

Ilustración 88: Cortante basal - sismo Pisco 2007 - dirección Y - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 89: Desplazamiento - sismo Pisco 2007 - dirección Y - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Tabla 40: Cortante y desplazamiento - análisis no lineal dinámico tiempo historia - dirección X - módulo 02

DIRECCIÓN X-X		
ANALISIS	CORTANTE BASAL MAXIMO (tn)	DESPLAZAMIENTO MAXIMO (cm)
ANLTH - LIMA 1966 - X	249.31	1.33
ANLTH - LIMA 1974 - X	246.64	1.19
ANLTH - PISCO 2007 - X	236.01	1.17
ANLE	295.00	2.30
MÁXIMO	249.31	1.33
PROMEDIO	243.98	1.23

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41: Cortante y desplazamiento - análisis no lineal dinámico tiempo historia - dirección Y - módulo 02

DIRECCIÓN Y-Y		
ANALISIS	CORTANTE BASAL MAXIMO (tn)	DESPLAZAMIENTO MAXIMO (cm)
ANLTH - LIMA 1966 - Y	253.02	4.30
ANLTH - LIMA 1974 - Y	256.81	4.48
ANLTH - PISCO 2007 - Y	233.43	4.70
ANLE	236.50	4.89
MÁXIMO	256.81	4.70
PROMEDIO	247.75	4.49

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 40 y 41 se muestran los valores máximos de cortante y desplazamiento en cada dirección de análisis. A continuación, se muestran los resultados de derivas en cada entrepiso y para cada registro sísmico.

Tabla 42: Derivas - análisis no lineal dinámico tiempo historia - módulo 02

Piso	DERIVA X-X		
	1966	1974	2007
Piso 1	0.002	0.002	0.002
Piso 2	0.002	0.002	0.001

Piso	DERIVA Y-Y		
	1966	1974	2007
Piso 1	0.007	0.007	0.007
Piso 2	0.006	0.007	0.007

Fuente: Elaboración propia

Comparación de resultados de los análisis no lineales

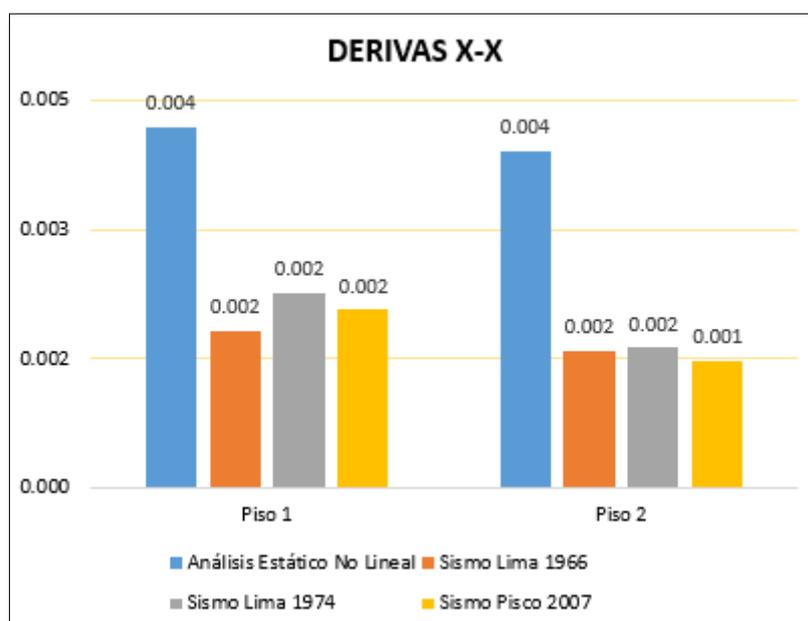
Se aprecia que en ambas direcciones se tiene derivas similares de acuerdo al análisis estático y dinámico no lineal. Cabe mencionar que en la dirección X el sistema estructural es albañilería confinada y en la dirección Y es muros de concreto armado.

Tabla 43: Derivas del análisis no lineal - dirección X - módulo 02

Derivas X-X				
Piso	Análisis Estático No Lineal	Sismo Lima 1966	Sismo Lima 1974	Sismo Pisco 2007
Piso 1	0.004	0.002	0.002	0.002
Piso 2	0.004	0.002	0.002	0.001

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 90: Comparación de derivas de los análisis no lineales - dirección X - módulo 02



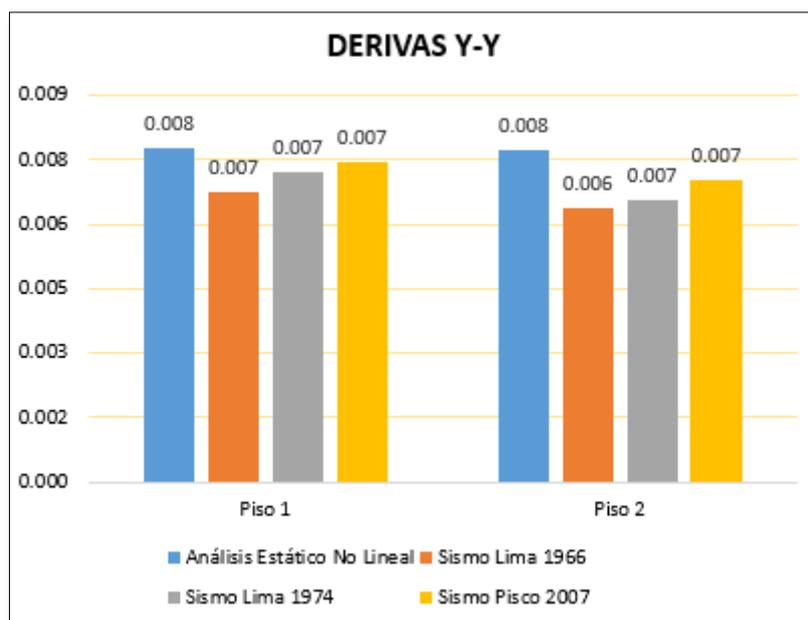
Fuente: Elaboración propia

Tabla 44: Derivas del análisis no lineal - dirección Y - módulo 02

Derivas Y-Y				
Piso	Análisis Estático No Lineal	Sismo Lima 1966	Sismo Lima 1974	Sismo Pisco 2007
Piso 1	0.008	0.007	0.007	0.007
Piso 2	0.008	0.006	0.007	0.007

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 91: Comparación de derivas de los análisis no lineales - dirección Y - módulo 02



Fuente: Elaboración propia

Discusión

- ✓ La Norma Diseño Sismorresistente E.030 menciona algunas restricciones para una edificación esencial en una zona sísmica 4, con los resultados mostrados anteriormente nos damos cuenta que el proyecto de la Institución Educativa en estudio si cumplió con lo establecido, debido a que no presenta sistema estructural aporticado, no presenta irregularidades tanto en planta como en altura y si cumple con criterios estructurales para la albañilería confinada.
- ✓ La curva de capacidad del módulo 01 en la dirección X presenta una cortante basal última de 238.28 tn y un desplazamiento 0.15 m y en la dirección Y se tiene una cortante de 471.78 tn y un desplazamiento de 0.05 m. La explicación de esta variación de resultados es debido a que en la dirección X el sistema estructural es muros de concreto armado, donde presenta menor cortante pero mayor desplazamiento, caso contrario sucede en la dirección Y, donde el sistema estructural es albañilería confinada y presenta mayor cortante pero menor capacidad de ductilidad.
- ✓ La curva de capacidad del módulo 02 en la dirección X presenta una cortante basal última de 357.48 tn y un desplazamiento 0.05 m y en la dirección Y se tiene una cortante

de 201.019 tn y un desplazamiento de 0.135 m. La explicación es que en la dirección X el sistema estructural es albañilería confinada, donde presenta mayor cortante pero menor desplazamiento, caso contrario sucede en la dirección Y, donde el sistema estructural es muros de concreto armado y presenta menor cortante pero mayor capacidad de ductilidad.

- ✓ El objetivo de diseño de la Norma E.030 es de resguardo de vida para una edificación esencial expuesta a un sismo máximo, y según los resultados de la presente investigación el desempeño estructural del módulo 01 es de resguardo de vida y del módulo 02 es operacional, con ello queda comprobado que el proyecto cumple con las exigencias de la normativa.

- ✓ Según Núñez [3] indica que tanto el análisis estático no lineal y dinámico no lineal tiempo historia presentan una respuesta similar, lo cual queda comprobado, ya que las derivadas en ambos módulos en estudio presentan una gran similitud.

Conclusiones

Módulo 01

- Mediante el análisis estático y dinámico lineal, el módulo 01 presenta derivas máximas de 0.006 en la dirección X y 0.002 en la dirección Y, menores a lo que indica la Norma E.030. Además, es regular en planta como en altura y los muros portantes de albañilería no presentan fallas por pandeo ni por fisuración.
- Con el análisis estático no lineal se obtuvo la curva de capacidad en la dirección X con un desplazamiento máximo de 15 cm y una cortante basal de 238.28 tn y en la dirección Y con un desplazamiento máximo de 5 cm y una cortante de 471.78 tn. Con ello se pudo determinar el desplazamiento objetivo que en la dirección X es de 7.115 cm con una cortante de 250.9 tn y en la dirección Y es de 2.194 cm con una cortante de 369 tn, encontrándose la estructura en el nivel de desempeño de resguardo de vida.
- En el análisis dinámico no lineal Tiempo Historia - dirección X, se obtuvo para el sismo de Lima del 1966 una cortante de 275.06 tn y su desplazamiento de 6.71 cm, para el sismo de Lima del 1974 una cortante de 247.75 tn y su desplazamiento de 6.75 cm, para el sismo de Pisco del 2007 una cortante de 279.94 tn y su desplazamiento de 9.37 cm. El promedio de los tres registros sísmicos genera una cortante de 267.58 tn y un desplazamiento de 7.61 cm, los cuales son muy cercanos al desplazamiento objetivo y su respectiva cortante obtenido del análisis pushover.
- Con el análisis dinámico no lineal Tiempo Historia – dirección Y, se obtuvo para el sismo de Lima del 1966 una cortante de 343.72 tn y su desplazamiento de 1.75 cm, para el sismo de Lima del 1974 una cortante de 229.58 tn y su desplazamiento de 1.99 cm, para el sismo de Pisco del 2007 una cortante de 396.63 tn y su desplazamiento de 1.47 cm. El promedio de los tres registros sísmicos genera una cortante de 323.31 tn y un desplazamiento de 1.74 cm, los cuales son muy cercanos al desplazamiento objetivo y su cortante obtenido del análisis pushover.
- Con el análisis tiempo historia se obtuvo derivas máximas – dirección X, las cuales para el sismo de Lima del 1966 es de 0.011, para el sismo de Lima 1974 es de 0.011 y para

el sismo de Pisco del 2007 es de 0.015. Todas estas derivas se encuentran en el nivel de resguardo de vida y se asemejan mucho a la deriva de 0.011 obtenida del pushover.

- Con el análisis tiempo historia se obtuvo derivas máximas – dirección Y, las cuales para el sismo de Lima del 1966 es de 0.004, para el sismo de Lima del 1974 es del 0.004 y para el sismo de Pisco del 2007 es de 0.004. Todas estas derivas se encuentran en el nivel de resguardo de vida y son exactas a la deriva de 0.004 obtenida del pushover.
- Con los resultados mostrados anteriormente nos damos cuenta que la estructura se encuentra en el nivel de desempeño de resguardo de vida, donde los elementos estructurales y no estructurales presentan daños moderados, pero mantiene un margen contra el colapso y además cumple con los objetivos de la Norma E.030, por lo tanto, se concluye que no se necesita ningún tipo de reforzamiento.

Módulo 02

- Utilizando el análisis lineal el módulo 02 presenta derivas máximas de 0.002 en la dirección X y 0.004 en la dirección Y, inferiores a lo que indica la Norma E.030. Además, no presenta irregularidades, cumple con la densidad mínima de muros portantes y estos no se fisuran ni pandean.
- Mediante el análisis pushover se obtuvo la curva de capacidad en la dirección X con un desplazamiento máximo de 5 cm y una cortante de 357.48 tn y en la dirección Y con un desplazamiento máximo de 13.5 cm y una cortante de 201.019 tn. Gracias a ello se pudo determinar el desplazamiento objetivo que en la dirección X es de 2.269 cm con una cortante basal de 295 tn y en la dirección Y es de 4.89 cm con una cortante de 236.5 tn, encontrándose la estructura en un nivel de desempeño operativo.
- En el análisis dinámico no lineal Tiempo Historia - dirección X, se obtuvo para el sismo de Lima del 1966 una cortante de 249.31 tn y su desplazamiento de 1.33 cm, para el sismo de Lima del 1974 una cortante de 246.64 tn y su desplazamiento de 1.19 cm, para el sismo de Pisco del 2007 una cortante de 236.01 tn y su desplazamiento de 1.17 cm. El promedio de los tres registros sísmicos genera una cortante de 243.98 tn y un

desplazamiento de 1.23 cm, los cuales son cercanos al desplazamiento objetivo y su respectiva cortante obtenido del análisis pushover.

- Con el análisis dinámico no lineal Tiempo Historia – dirección Y, se obtuvo para el sismo de Lima del 1966 una cortante de 253.02 tn y su desplazamiento de 4.30 cm, para el sismo de Lima del 1974 una cortante de 256.81 tn y su desplazamiento de 4.48 cm, para el sismo de Pisco del 2007 una cortante de 233.43 tn y su desplazamiento de 4.70 cm. El promedio de los tres registros sísmicos genera una cortante de 247.75 tn y un desplazamiento de 4.49 cm, los cuales son muy cercanos al desplazamiento objetivo y su cortante obtenido del análisis pushover.
- Con el análisis tiempo historia se obtuvo derivas máximas – dirección X, las cuales para el sismo de Lima del 1966 es de 0.002, para el sismo de Lima 1974 es de 0.002 y para el sismo de Pisco del 2007 es de 0.002. Todas estas derivas se encuentran en el nivel de desempeño operativo y se asemejan mucho a la deriva de 0.004 obtenida del pushover.
- Con el análisis tiempo historia se obtuvo derivas máximas – dirección Y, las cuales para el sismo de Lima del 1966 es de 0.007, para el sismo de Lima del 1974 es del 0.007 y para el sismo de Pisco del 2007 es de 0.007. Todas estas derivas se encuentran en el nivel de desempeño operativo y son casi exactas a la deriva de 0.008 obtenida del pushover.
- Con los resultados mostrados anteriormente nos damos cuenta que la estructura se encuentra en el nivel de desempeño operacional, donde existen pequeños daños en los elementos estructurales y daños moderados en elementos no estructurales, por lo tanto, si cumple con los objetivos de la Norma E.030 y se concluye que no necesita ningún tipo de reforzamiento.
- La aplicación del análisis no lineal en la evaluación del desempeño estructural es beneficioso ya que nos permite saber con mayor exactitud el comportamiento de la estructura frente a un evento sísmico y ver si cumple con los requerimientos de la Norma E.030.

Recomendaciones

- Si bien la edificación se encuentra en un buen desempeño estructural se recomienda ejecutar un mantenimiento periódico para evitar filtraciones de agua proveniente de las lluvias en la zona, ya que podría perjudicar la resistencia de los elementos estructurales.
- Se recomienda a las próximas investigaciones realizar ensayos a los elementos estructurales en estudio, debido a que algunas edificaciones puede que se encuentran deterioradas y con los ensayos se podrá determinar cuáles son sus verdaderas propiedades mecánicas en ese instante de tiempo.
- En el análisis dinámico no lineal tiempo historia se recomienda utilizar más registros sísmicos con la finalidad de tener mayor aproximación a los resultados obtenidos en el análisis pushover.
- Se recomienda realizar el respectivo tratamiento a las señales sísmicas a utilizar en el análisis no lineal, verificando que estén corregidas por línea base y filtrado, escaladas y compatibles con el espectro elástico y finalmente acortadas para que no demore mucho en analizar en software Etabs.

Referencias bibliográficas

- [1] J. F. Choque Sucasaca y E. D. Luque Solis, «Análisis estático no lineal y evaluación del desempeño sísmico de un edificio de 8 niveles diseñado con la norma E.030,» Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, 2019.
- [2] N. F. Fuentes Rivera Silva, «Desempeño sísmico de un edificio de cinco niveles de concreto armado mediante el análisis estático no lineal "Pushover",» Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo", Huaraz, 2018.
- [3] A. B. Núñez Palacios, «Diseño por desempeño de un edificio de hormigón armado utilizando el método de análisis tiempo-historia,» Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2017.
- [4] J. A. Fernández Salvador Pérez y M. E. Subía Carrillo, «Análisis no lineal estático: evaluación del desempeño de una estructura de hormigón y una de acero diseñada usando los códigos ASCE 7-10 y NEC 11 mediante el código ASCE 41-06,» Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2014.
- [5] K. S. Alcántara Méndez y C. E. Nalvarte Gurmendi, «Desempeño estructural aplicando la norma ATC-40 para el reforzamiento del pabellón "Monoblock" del Instituto Nacional de Salud del Niño (Breña-Lima),» Universidad de San Martín de Porres, Lima, 2016.
- [6] R. M. Calcina Peña, «Evaluación del desempeño sísmico de un edificio de once pisos utilizando análisis estático y dinámico no lineal,» Universidad Privada de Tacna, Tacna, 2017.
- [7] Y. H. Salcedo Barco, «Desempeño sísmico por el método push-over de un edificio construido en la ciudad de Barranquilla bajo la norma NSR-10,» Universidad de la Costa, Barranquilla, 2017.
- [8] L. Ocala, «Peligro, Vulnerabilidad, riesgo y la posibilidad de desastres sísmicos en el Perú,» *Revista Geofísica* 61, 2005.
- [9] J. L. Castillo Aedo y J. E. Alba Hurtado , «Peligro Sísmico en el Perú,» de *Congreso Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones*, Lima, 1993.
- [10] K. d. I. A. Intor Villatty y C. J. Martos Ramírez , «Desempeño Sísmico del Módulo "A" de la I.E. San Ramón en la Ciudad de Cajamarca - 2017,» Universidad Privada del Norte, Cajamarca - Perú, 2017.

- [11] SEAOC, «Performance Based Seismic Engineering of Buildings,» VISION 2000 Committee: Structural Engineering Association of California , California, 1995.
- [12] Ministerio de Vivienda y Construcción, «Norma E.031 Aislamiento Sísmico,» Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, 2019.
- [13] I. D. Torrealva, Artist, *Conservación, Intervención, Adecuación y Refuerzo de Construcciones Existentes*. [Art]. Maestría en Ingeniería Civil Pontificia Universidad Católica del Perú, 2020.
- [14] Ministerio de Vivienda y Construcción, «Norma E.030 Diseño Sismorresistente,» Reglamento Nacional de Edificaciones, Lima, 2019.
- [15] A. Muñoz Peláez, «Comentario a la Norma Peruana E.030 Diseño Sismorresistente,» Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción , Lima, 2020.
- [16] D. A. Chang Tokushima, «Estudio de Relaciones Momento - Curvatura en Secciones de Concreto Armado y Concreto Preesforzado Sometidas a Flexión,» Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, 2015.
- [17] G. G. Deierlein, A. M. Reinhorn y M. R. Willford, «Nonlinear Structural Analysis For Seismic Design,» National Institute of Standards and Technology, San Francisco, California, 2010.
- [18] G. Gonzales, A. Aguilar y G. Huaco, «Análisis Dinámico Incremental de un Hospital de 60 años de Antigüedad con Muros de Albañilería Artesanal,» de *LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, Buenos Aires, Argentina, 2020.
- [19] A. Llocle Helaccama, «Evaluación de desempeño estructural utilizando Análisis Estático no lineal (Pushover) del bloque del nivel secundario del colegio Emblemático Ladislao Espinar ubicado en la ciudad de Espinar – Cusco,» Universidad Peruana Unión, Juliaca, 2021.
- [20] C. E. Duarte Bonilla, M. E. Martinez Chavarria y J. J. Santamaria Diaz, «Análisis Estático no Lineal (Pushover) del Cuerpo Central del Edificio de la Facultad de Medicina de la Universidad de El Salvador,» Universidad de El Salvador, San Salvador, 2017.
- [21] M. Á. Paredes Azaña, «Evaluación del Desempeño Sismorresistente de un Edificio Destinado a Vivienda en la Ciudad de Lima Aplicando el Análisis Estático No Lineal Pushover,» Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, 2016.

- [22] L. E. Merino Zelada, «Desempeño Sismorresistente del Edificio 4J de la Universidad Nacional de Cajamarca,» Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 2014.

Anexos

Anexo 01: Procedimiento computacional del Módulo 02

- Creación de los materiales: concreto, acero y albañilería

The image displays three screenshots of the 'Material Property Data' dialog box in ETABS software, showing the configuration for different materials.

Material 1: Concrete (FC=210)

- General Data:** Material Name: FC=210; Material Type: Concrete; Directional Symmetry Type: Isotropic; Material Display Color: Blue.
- Material Weight and Mass:** Specify Weight Density (selected); Weight per Unit Volume: 2.40 tonf/m³; Mass per Unit Volume: 0.244732 tonf-s³/m⁴.
- Mechanical Property Data:** Modulus of Elasticity, E: 2173700 tonf/m²; Poisson's Ratio, U: 0.15; Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000055 1/F; Shear Modulus, G: 945086.96 tonf/m².

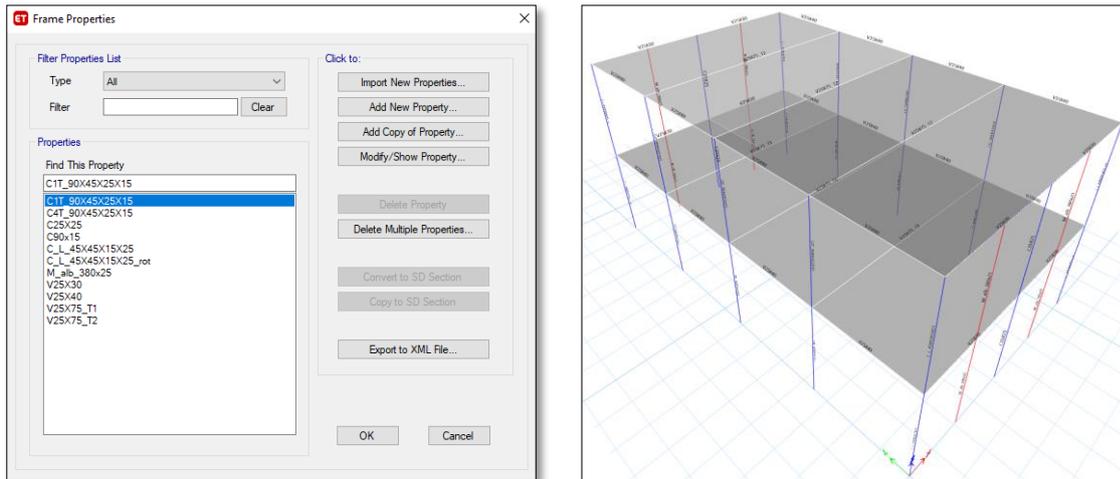
Material 2: Rebar (A615Gr60)

- General Data:** Material Name: A615Gr60; Material Type: Rebar; Directional Symmetry Type: Uniaxial; Material Display Color: Blue.
- Material Weight and Mass:** Specify Weight Density (selected); Weight per Unit Volume: 7.85 tonf/m³; Mass per Unit Volume: 0.800477 tonf-s³/m⁴.
- Mechanical Property Data:** Modulus of Elasticity, E: 2000000 tonf/m²; Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000065 1/F.

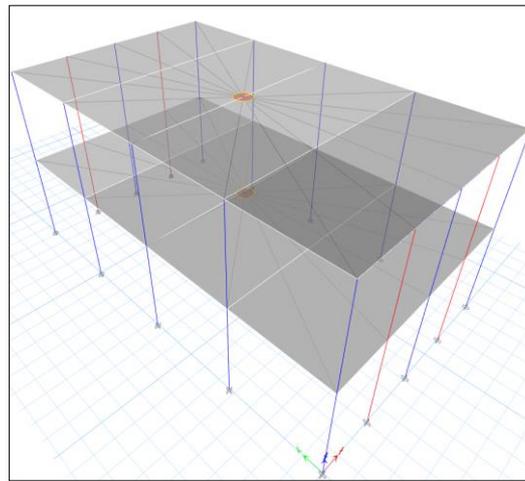
Material 3: Masonry (Albañilería_fm=65kg/cm2)

- General Data:** Material Name: Albañilería_fm=65kg/cm2; Material Type: Masonry; Directional Symmetry Type: Isotropic; Material Display Color: Red.
- Material Weight and Mass:** Specify Weight Density (selected); Weight per Unit Volume: 1.8 tonf/m³; Mass per Unit Volume: 0.183549 tonf-s³/m⁴.
- Mechanical Property Data:** Modulus of Elasticity, E: 325000 tonf/m²; Poisson's Ratio, U: 0.25; Coefficient of Thermal Expansion, A: 0.0000045 1/F; Shear Modulus, G: 130000 tonf/m².

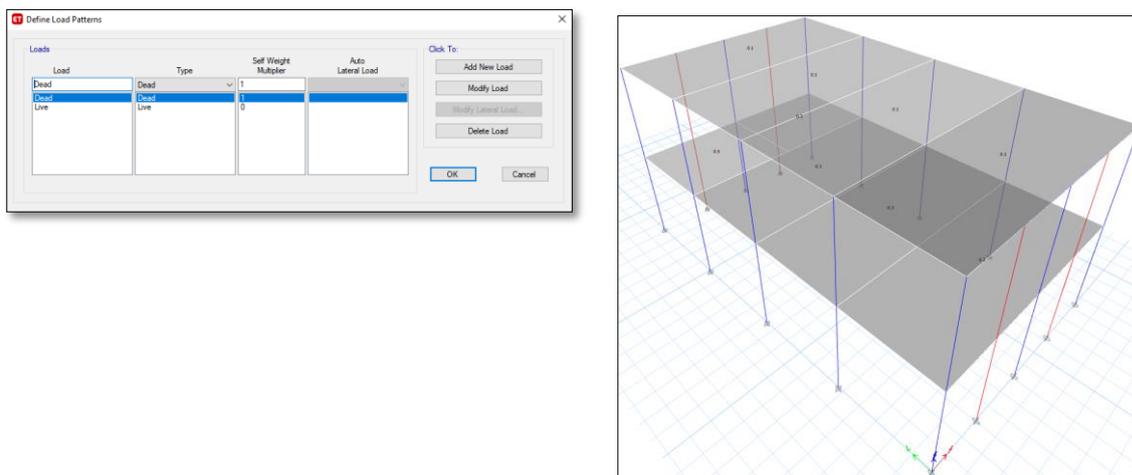
- Creación de vigas, muros de concreto armado, muros de albañilería y losa aligerada



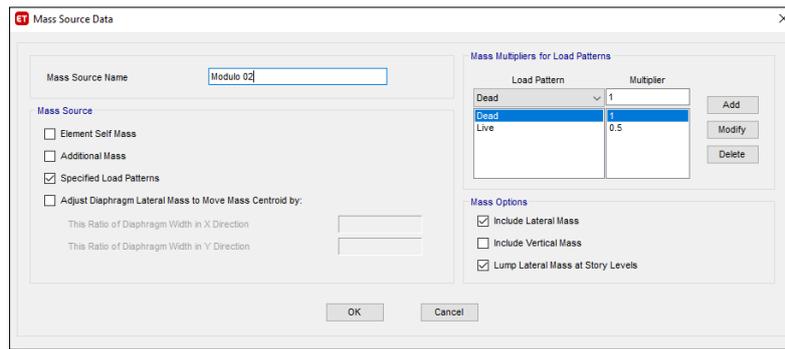
- Colocación de restricciones y diafragmas rígidos a cada piso de la estructura



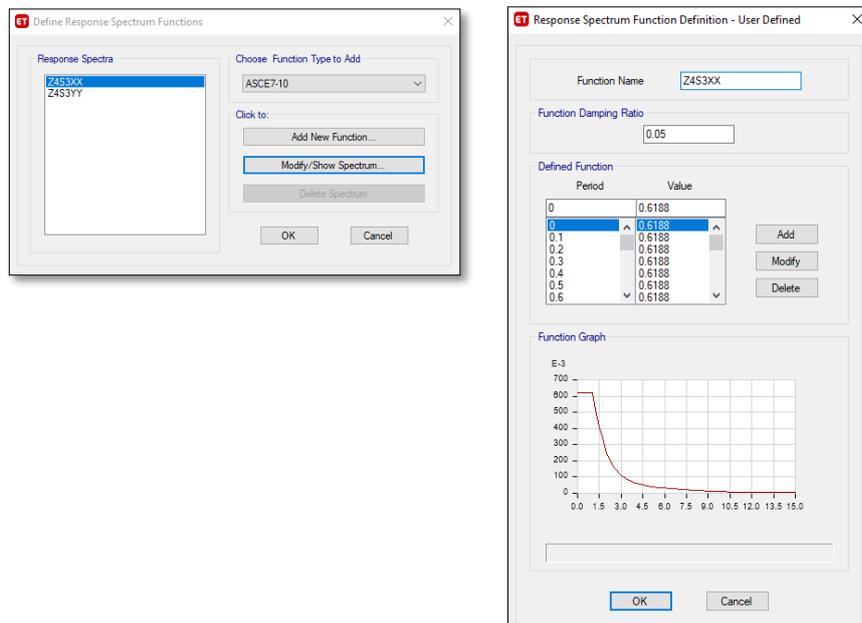
- Creación y asignación de carga muerta y carga viva



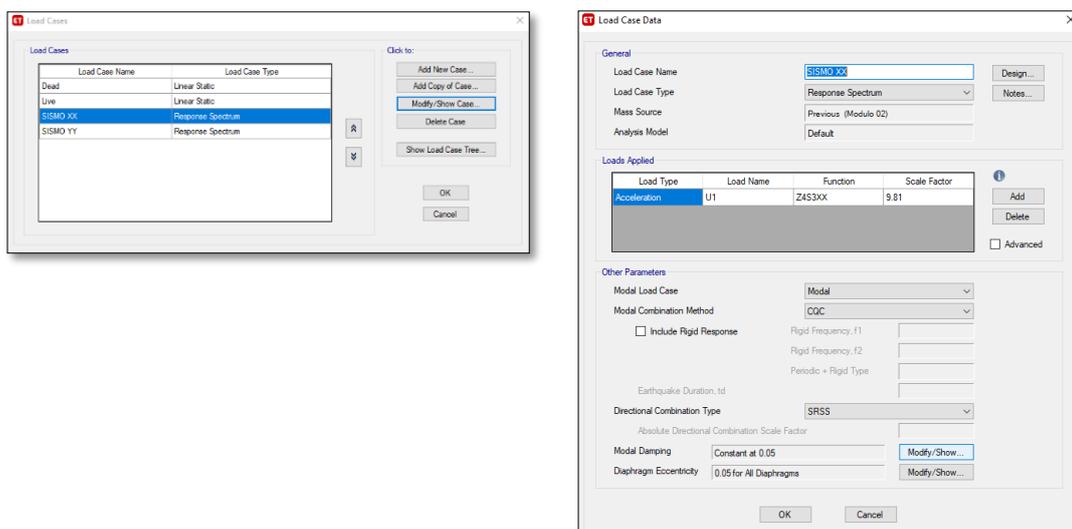
- Definir el Mass Source de la estructura



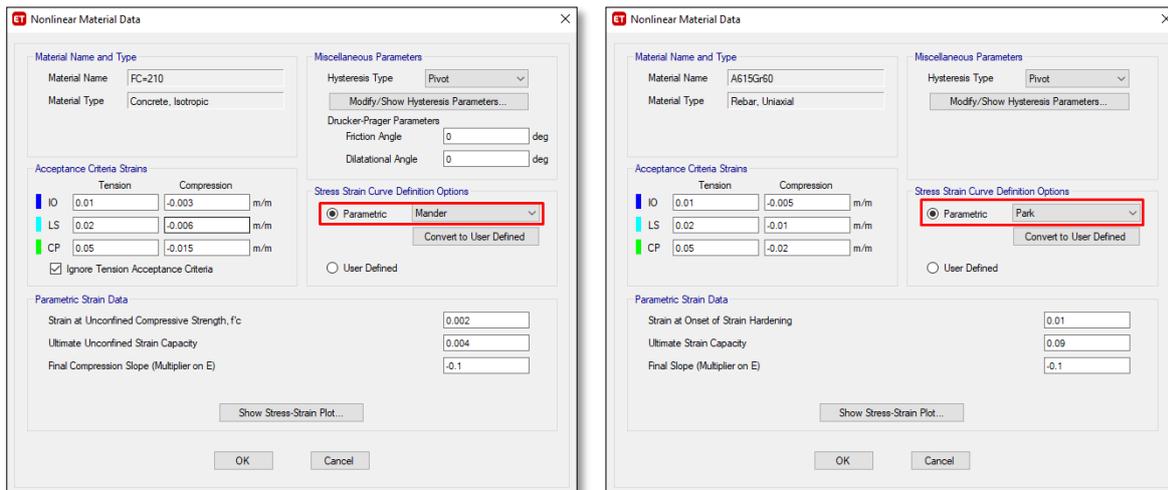
- Definir el espectro de pseudo aceleración en la dirección X e Y



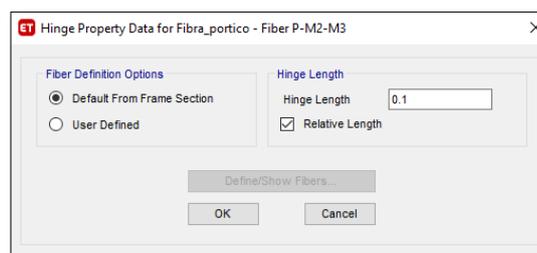
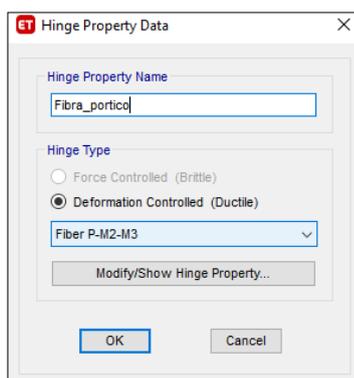
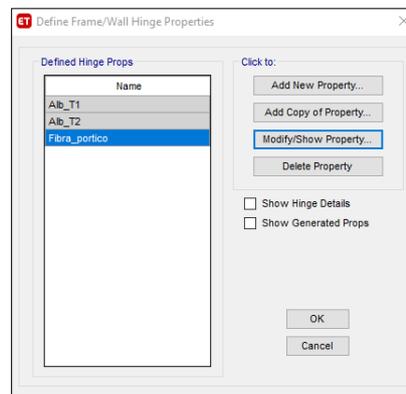
- Definir el sismo dinámico en la dirección X e Y



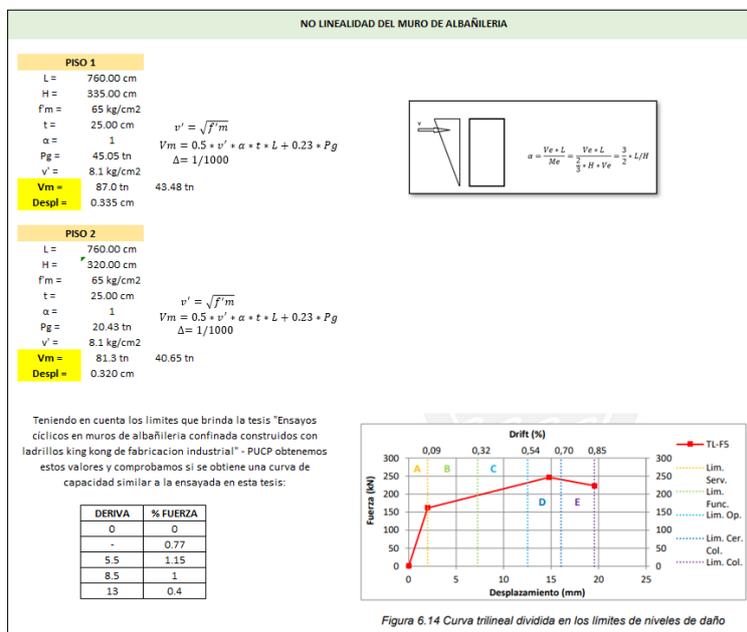
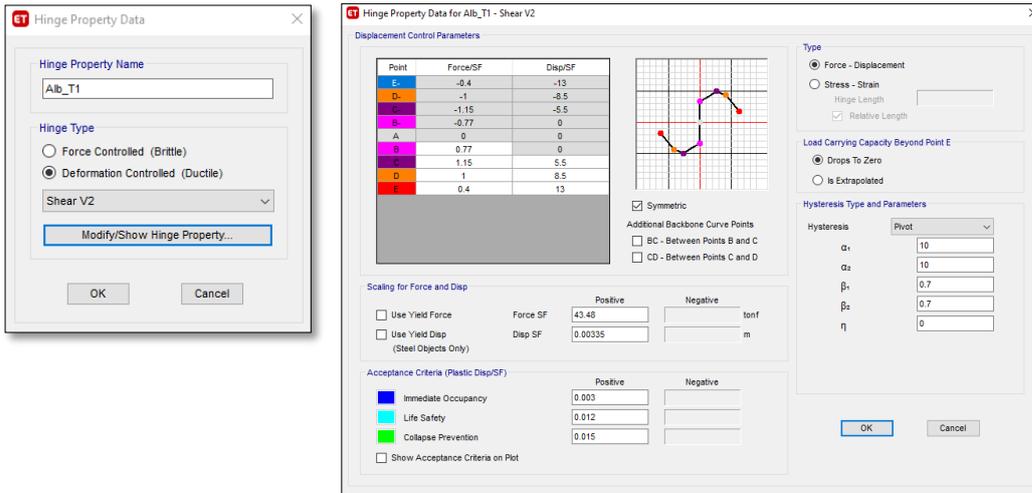
- Asignación de las propiedades no lineales de los materiales



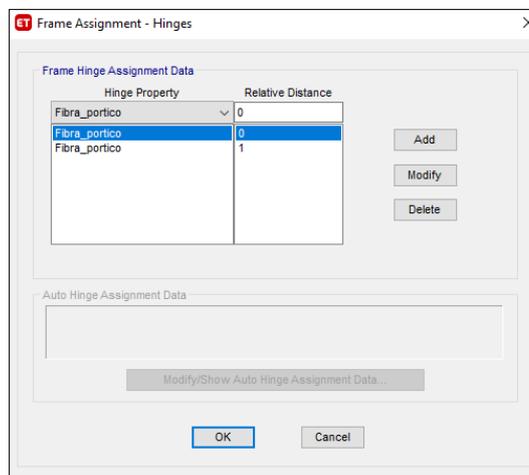
- Definir las rótulas plásticas en vigas, columnas y muros de concreto armado



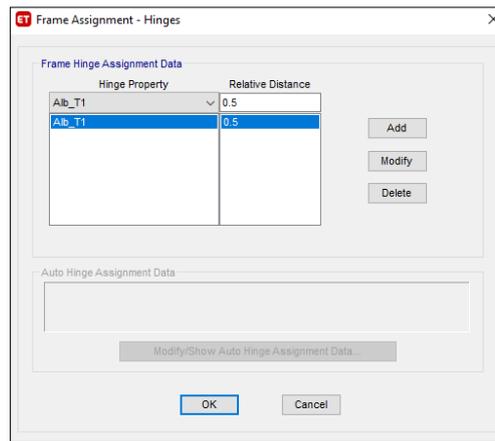
- Definir las rótulas plásticas en muros de albañilería



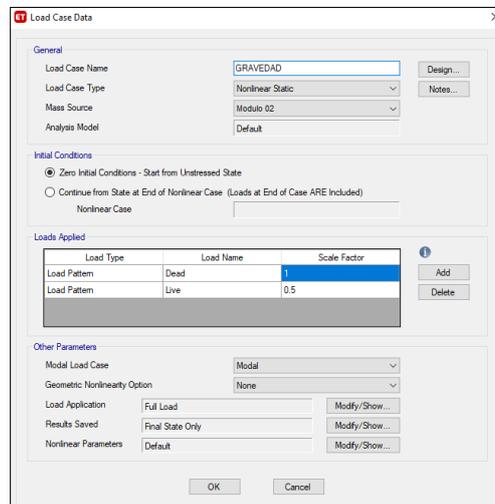
- Asignar las rotulas plásticas en vigas, columnas y muros de concreto armado



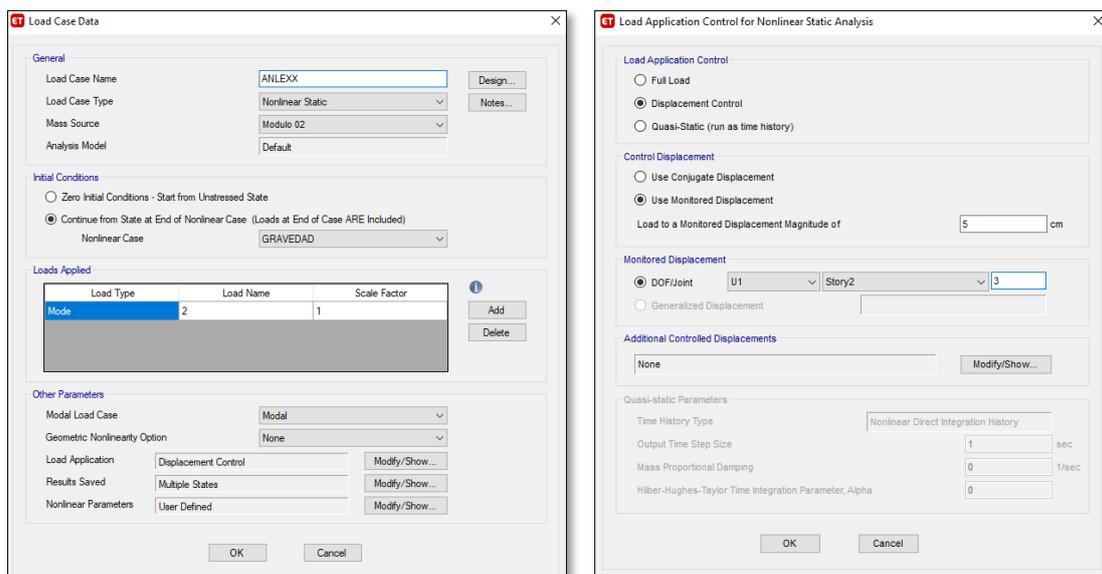
- Asignar las rótulas plásticas en muros de albañilería

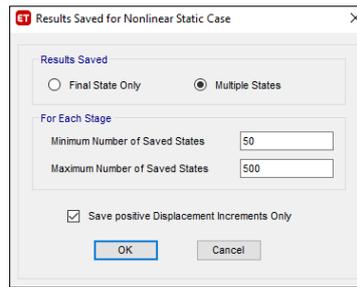


- Definir la carga gravitacional no lineal

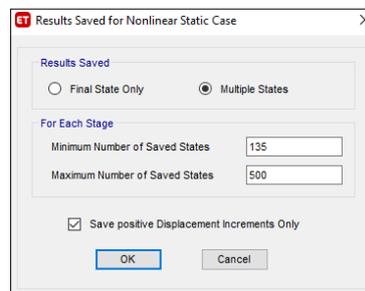
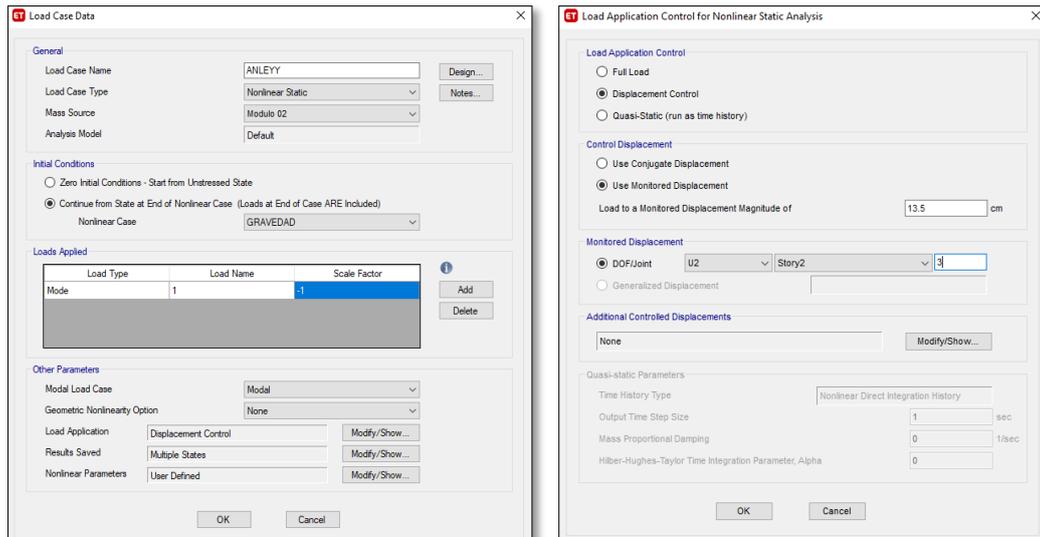


- Definir el caso de carga monotónica en la dirección X

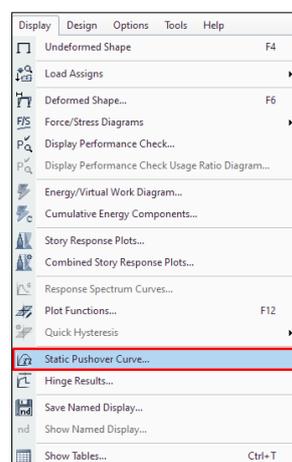




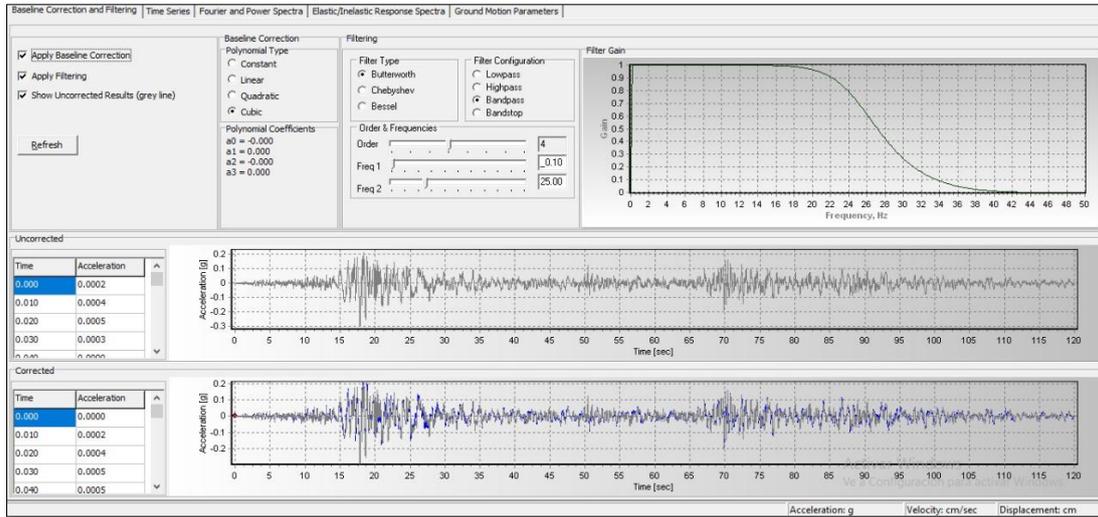
- Definir el caso de carga monotónica en la dirección Y



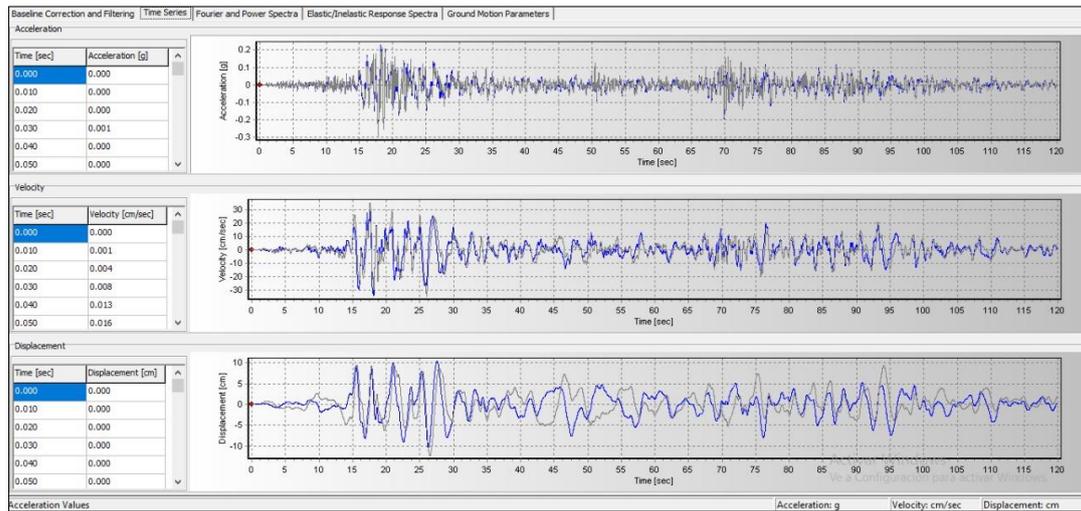
- Obtener la curva de capacidad en la dirección X e Y, tal como se muestra en el desarrollo de la tesis.



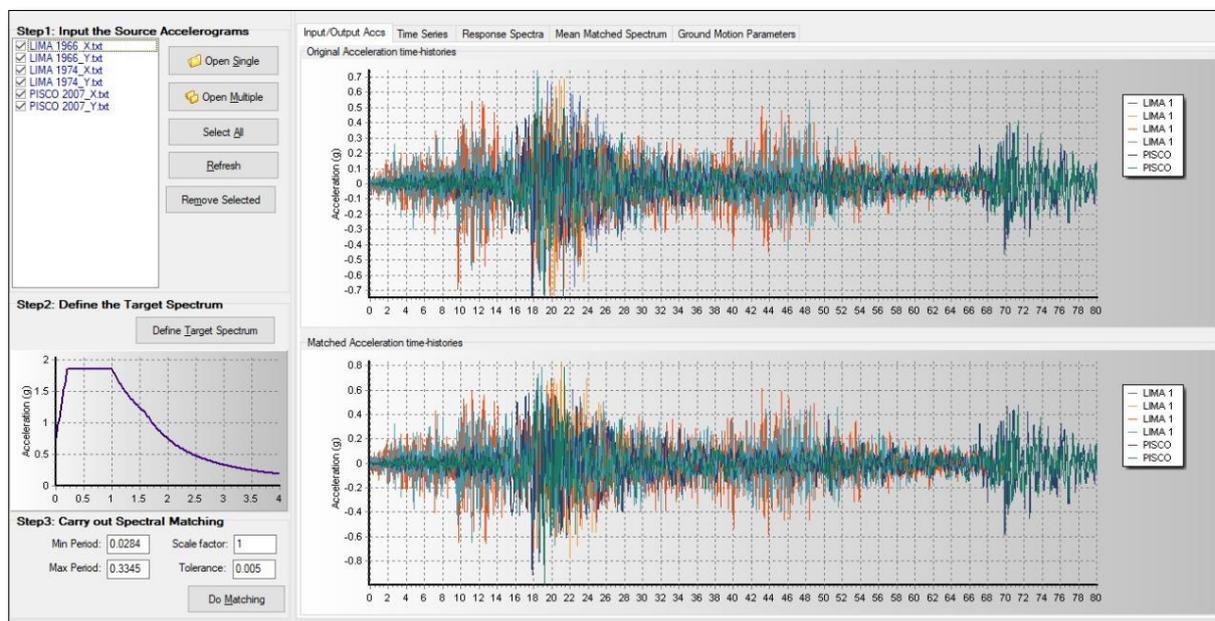
- El análisis dinámico no lineal tiempo historia consta en ingresar señales sísmicas a la estructura. Estas señales se descargan del CISMID – REDACIS y tienen que recibir un respectivo tratamiento.
- Primero se ingresa la señal al software SeismoSignal para realizar una corrección por línea base y filtrado.



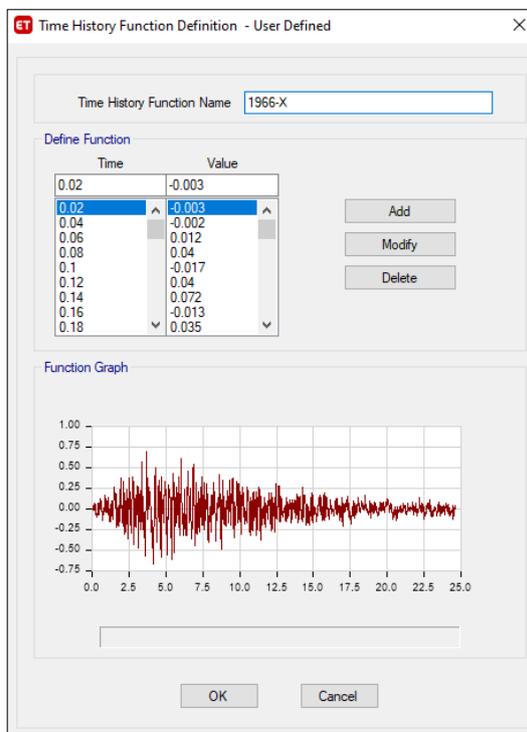
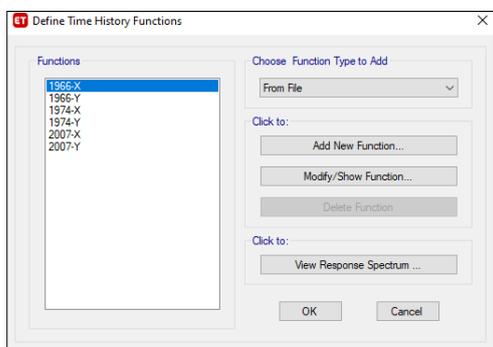
- En la siguiente imagen se puede observar que el desplazamiento de la señal del Sismo Pisco 2007 tiende a cero, lo cual sería correcto.



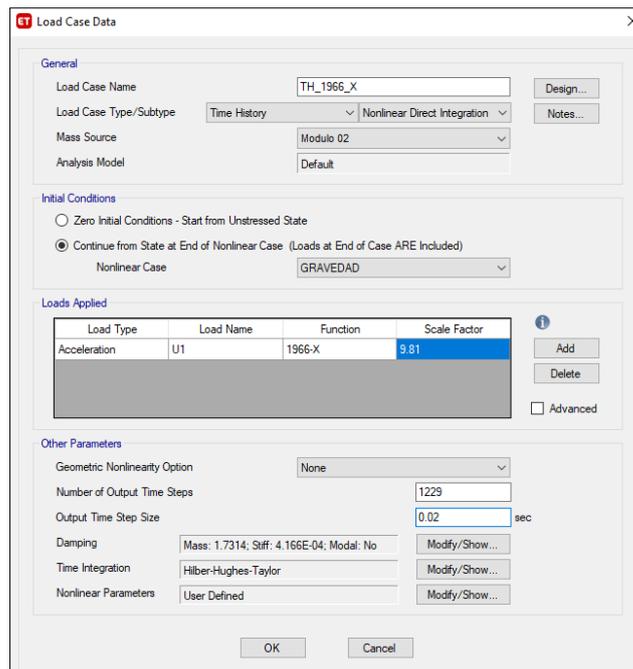
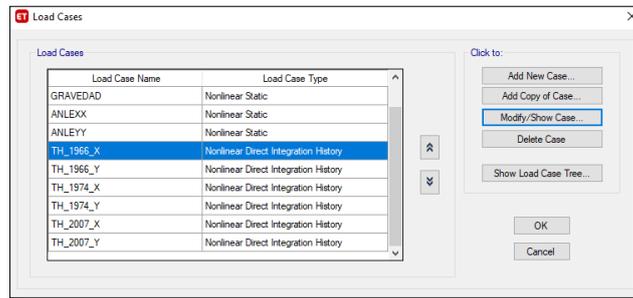
- Seguidamente la señal sísmica debe ser escalada y compatible con el espectro elástico en el rango de $0.2 T_{min}$ y $1.5 T_{max}$.



- Ya teniendo las señales sísmicas listas, se ingresan al software Etabs



- Se crea el caso de carga Tiempo Historia con una integración directa no lineal y se inicia con la carga por gravedad, aplicando la aceleración en cada dirección de análisis.



Anexo 02: Desempeño estructural del módulo 02 - Propiedades reducidas

- Se realizó la evaluación del desempeño estructural del módulo 02 – Bibliotecas, donde los elementos de concreto armado presentan un $f'_c = 160 \text{ kg/cm}^2$ y los muros portantes de albañilería tienen un $f'_m = 35 \text{ kg/cm}^2$.
- El desempeño estructural en la dirección X e Y es de resguardo de vida, con daños moderados en elementos estructurales y no estructurales, pérdida de rigidez y resistencia, pero con margen al colapso de la estructura. Además, cumple con los requerimientos de la Norma E.030, donde se indica que, para una edificación esencial expuesta a un sismo máximo, el desempeño estructural debe ser resguardo de vida.
- Este análisis se realizó con la finalidad de poder concluir que la estructura si presenta un buen desempeño a pesar de que su resistencia sea mucho menor a lo que indica el expediente.

