

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

**“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE HOSPITALES,
CON Y SIN SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA BASE FRENTE A
UN EVENTO SÍSMICO, EN LA ZONA TIPO 3, SEGÚN NORMA TÉCNICA
PERUANA E-031”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERA CIVIL**

AUTORA:

BACH. DORA DEL ROSARIO SANCHEZ MUÑOZ

ASESOR:

DR. ING. JAIME AMOROS DELGADO

CAJAMARCA – PERU

2026

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** DORA DEL ROSARIO SANCHEZ MUÑOZ

DNI: 70169000

Escuela Profesional: Ingeniería Civil

2. **Asesor:** Jaime Octavio Amoros Delgado

DNI: 26618473

Facultad: Ingeniería

3. **Grado académico o título profesional**

☐ Bachiller

☒ Título profesional

☐ Segunda especialidad

☐ Maestro

☐ Doctor

4. **Tipo de Investigación:**

☒ Tesis

☐ Trabajo de investigación

☐ Trabajo de suficiencia profesional

☐ Trabajo académico

5. **Título de Trabajo de Investigación:**

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE HOSPITALES, CON Y SIN SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA BASE FRENTE A UN EVENTO SÍSMICO, EN LA ZONA TIPO 3, SEGÚN NORMA TÉCNICA PERUANA E-031

6. **Fecha de evaluación:** 10/03/2026

7. **Software antiplagio:**

☒ TURNITIN

☐ URKUND (OURIGINAL) (*)

8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 6 %

9. **Código Documento:** trn:oid::3117:566135353

10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**



APROBADO



PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 10/03/2026

FIRMA DEL ASESOR

Nombres y Apellidos: Jaime Octavio Amoros Delgado

DNI: 26618473

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz
DIRECTORA

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

ACTA N° 0143-2026

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Art. 035 del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca, la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, da a conocer que, a los **doce días del mes de marzo de 2026**, siendo las once horas (11:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A – Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería, de la Universidad Nacional de Cajamarca, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Vocal : Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno.
Secretario : M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada **ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE HOSPITALES, CON Y SIN SISTEMA DE AISLAMIENTO SÍSMICO EN LA BASE FRENTE A UN EVENTO SÍSMICO, EN LA ZONA TIPO 3, SEGÚN NORMA TÉCNICA PERUANA E-031"**, presentado por la Bachiller en Ingeniería Civil **DORA DEL ROSARIO SANCHEZ MUÑOZ**, asesorada por el Dr. Ing. Jaime Octavio Amorós Delgado, para la obtención del Título Profesional.

Los Señores Miembros del Jurado replicaron a la sustentante, debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : ⁰⁶ PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : ¹¹ PTS.
EVALUACIÓN FINAL : ¹⁷ PTS ^{diecisiete} (En letras)

En consecuencia, se la declara ^{APROBADO} con el calificativo de ¹⁷ ^{diecisiete} acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las ^{12:00 pm} horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Presidente

Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno.
Vocal

M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares.
Secretario

Dr. Ing. Jaime Octavio Amorós Delgado.
Asesor

COPYRIGHT © 2026 by
SÁNCHEZ MUÑOZ, DORA DEL ROSARIO
Todos los derechos reservados.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiar siempre mis pasos en cada etapa de mi vida y permitirme alcanzar esta meta tan importante.

A mis queridos padres, Pedro y Dora, gracias por su amor incondicional, por inculcarme valores y enseñarme la importancia del estudio y la constancia. Agradezco profundamente sus sabios consejos, su sacrificio y motivación constante, siempre apoyándome y animándome a seguir adelante para ser una mejor persona y profesional.

A mis hermanos, Javier, Mardeli y Rosa, por su cariño, sus locuras y alegrías, y su apoyo incondicional. Sus palabras de aliento, sus consejos y su invaluable compañía en cada momento fueron un impulso fundamental para superarme cada día.

A mis asesores de tesis, Marcos Mendoza Linares y Jaime Amorós Delgado, por su gran calidad humana, paciencia, dedicación y profesionalismo. Gracias por su apoyo, experiencia y compromiso académico.

Un agradecimiento especial a mi amigo Sebastián Zegarra, pilar y mentor fundamental en el desarrollo de esta investigación. Gracias por su excelente predisposición, experiencia y conocimientos. Sus valiosos consejos me permitieron resolver dudas y avanzar con mayor claridad en los momentos decisivos.

Finalmente, a Estefanía A., Lidia, Marisol M., Nancy S., Oscar O. y Percy H, así como a todas las personas que contribuyeron directa o indirectamente. Gracias por saber escuchar, por sus sabios consejos y por su constante motivación a lo largo de este proceso.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, por ser mi principal fuente de apoyo y motivación, por creer en mí en todo momento y por impulsarme a seguir adelante con esfuerzo, constancia y deseos de superación. Este logro es también de ustedes, quienes me enseñaron el valor del sacrificio y la perseverancia

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS Y NOMENCLATURA.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	2
1.1.1. Formulación del problema	3
1.1.2. Hipótesis general de investigación.....	3
1.2. Justificación de la investigación.....	3
1.3. Alcances y delimitación de la investigación.....	3
1.4. Limitaciones	4
1.5. Objetivos.....	4
1.5.1. Objetivo general	4
1.5.2. Objetivos específicos.....	4
1.6. Descripción de los contenidos	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6
2.1. Antecedentes teóricos	6
2.1.1. Internacionales.....	6
2.1.2. Nacionales	7
2.1.3. Locales	9
2.2. Bases teóricas	10
2.2.1. Principales teorías en el análisis y comportamiento estructural.....	10

2.2.2	Aspectos normativos	15
2.2.3.	Aisladores.....	25
2.3.	Definición de términos básicos.....	35
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....		36
3.1.	Ubicación geográfica.....	36
3.2.	Tiempo y época de investigación	37
3.3.	Metodología.....	37
3.3.1.	Tipo de investigación	37
3.3.2.	Nivel y diseño de investigación	37
3.3.3.	Enfoque:	38
3.3.4.	Método de investigación	38
3.3.5.	Población de estudio.....	38
3.3.6.	Muestra.....	38
3.3.7.	Variables:	38
3.3.8.	Unidad de análisis	39
3.3.9.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	39
3.4.	Procedimiento	40
3.4.1.	Arquitectura.....	40
3.4.2.	Predimensionamiento de elementos estructurales.....	41
3.4.3.	Metrado de cargas	43
3.4.4.	Modelamiento estructural.....	45
3.4.5.	Análisis sísmico.....	48
3.5.	Verificación de resultados	81
3.5.1.	Verificación de irregularidades	81
3.5.2.	Verificación Del Sistema De Aislación.....	86
3.5.3.	Junta sísmica	88
3.6	Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados	89
3.6.1	Tratamiento y análisis de datos:	89
3.6.2	Presentación de resultados.....	93
CAPÍTULO IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS		106
4.1.	Análisis de datos.....	106

4.2.1	Cortante de entre piso.....	106
4.2.2	Derivas de entre piso	106
4.2.3	Aceleraciones	106
4.2.	Discusión de resultados	107
4.2.4	Cortante de entre piso.....	107
4.2.5	Derivas de entre piso	107
4.2.6	Aceleraciones	108
4.3.	Contrastación de hipótesis	108
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		109
5.1.	Conclusiones.....	109
5.2.	Recomendaciones	109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		110
ANEXOS.....		114
PLANOS		115

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Corte transversal de un sistema de aislamiento	27
Figura 2 Modelo bilineal de los aisladores elastoméricos.....	29
Figura 3 Ubicación en la ciudad de Cajamarca en Perú.....	36
Figura 4 Modelamiento arquitectónico	40
Figura 5 Modelamiento arquitectónico	40
Figura 6 Área tributaria	42
Figura 7 Distribución del peso de la tabiquería fija y el peso propio de la losa	44
Figura 8 Distribucion de cargas muertas en las vigas.....	45
Figura 9 Modelo de estructura en base fija.....	46
Figura 10 Modelo inicial	47
Figura 11 Modelo de estructura en base aislada	47
Figura 12 Espectro del coeficiente de amplificación sísmica (C).	49
Figura 13 Espectro de pseudo aceleraciones	50
Figura 14 Espectro del coeficiente de amplificación sísmica (C) (NTE- E.031).	51
Figura 15 Espectro de pseudo aceleraciones con la NTE E.031	52
Figura 16 Espectros de respuesta elásticos compatibilizados	54
Figura 17 Verificación espectral	55
Figura 18 Curva bilineal nominal de dispositivos de aislamiento	59
Figura 19 Curva bilineal superior de dispositivos de aislamiento.....	61
Figura 20 Curva bilineal inferior de dispositivos de aislamiento	62
Figura 21 Curva de histéresis de lazo nominal	72
Figura 22 Curva de histéresis de lazo superior.....	72
Figura 23 Curva de histéresis de lazo inferior	73
Figura 24 Landa mínima	73
Figura 25 Curva de histéresis.....	74

Figura 26 <i>Cargas máximas a compresión</i>	76
Figura 27 <i>Diagrama de flujo de la metodología de análisis estructural</i>	78
Figura 28 <i>Diagrama de flujo para el diseño del sistema de aislamiento sísmico</i>	79
Figura 29 <i>Diagrama de flujo para landa máximo y landa mínimo</i>	80
Figura 30 <i>Fuerzas máximas a tracción</i>	87
Figura 31 <i>Límite de 7‰ en deriva de entrepiso</i>	90
Figura 32 <i>Límite de 3.5‰ en deriva de entrepiso</i>	91
Figura 33 <i>Límite de 5‰ en deriva de entrepiso</i>	91
Figura 34 <i>Comparación de Derivas: Modal Espectral 500 años</i>	94
Figura 35 <i>Comparación de Derivas: Modal Espectral 2500 años</i>	95
Figura 36 <i>Comparación de Derivas: Tiempo Historia 2500 años</i>	96
Figura 37 <i>Comparación de Cortante Superestructura: Modal Espectral 500 años</i>	98
Figura 38 <i>Comparación de Cortante Superestructura: Modal Espectral 2500 años</i>	99
Figura 39 <i>Comparación de Cortante Superestructura: Tiempo Historia 2500 años</i>	100
Figura 40 <i>Comparación de Cortante en la base: Modal Espectral 500 años</i>	101
Figura 41 <i>Comparación de Cortante en la base: Modal Espectral 500 años</i>	101
Figura 42 <i>Comparación de Cortante en la base: Tiempo historial 2500 años</i>	102
Figura 43 <i>Comparación de Aceleraciones de Entrepiso: Modal Espectral 500 años</i>	103
Figura 44 <i>Comparación de Aceleraciones: Modal Espectral 2500 años</i>	104
Figura 45 <i>Comparación de Aceleraciones: Tiempo Historia 2500 años</i>	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Descripción de los diferentes métodos de análisis sísmico	12
Tabla 2 Factores de modificación máximo	24
Tabla 3 Cuadro comparativo de los tipos de aisladores elastoméricos	26
Tabla 4 Resumen de las velocidades de onda de corte (V_s).....	37
Tabla 5 Elementos estructurales en Etabs v22.....	46
Tabla 6 Resumen de parámetros sísmicos.....	48
Tabla 7 Factores de escala.....	53
Tabla 8 Periodo y masa efectiva	56
Tabla 9 Masa de la estructura.....	56
Tabla 10 Sistema aislación:	57
Tabla 11 Propiedades nominales	59
Tabla 12 Límite superior:.....	60
Tabla 13 Límite inferior:	62
Tabla 14 Propiedades nominales	64
Tabla 15 Cortante en la super estructura para propiedades nominales.....	64
Tabla 16 Desplazamientos total máximo para propiedades nominales.....	64
Tabla 17 Propiedades superiores.....	66
Tabla 18 Cortante en la super estructura	66
Tabla 19 Cortante en la super estructura para todos los niveles	67
Tabla 20 Derivas de entrepiso.....	67
Tabla 21 Aceleración.....	68
Tabla 22 Desplazamientos	68
Tabla 23 Propiedades inferiores	70
Tabla 24 Derivas de entrepiso.....	70
Tabla 25 Desplazamientos	71

Tabla 26 <i>Landa mínimo</i>	71
Tabla 27 <i>Las propiedades finales:</i>	74
Tabla 28 <i>Selección del tipo de aislador</i>	76
Tabla 29 <i>Irregularidad Torsional</i>	81
Tabla 30 <i>Irregularidad de Masa</i>	81
Tabla 31 <i>Irregularidad de Rigidez</i>	81
Tabla 32 <i>Irregularidad Geométrica</i>	82
Tabla 33 <i>Irregularidad Torsional</i>	83
Tabla 34 <i>Irregularidad de Masa</i>	83
Tabla 35 <i>Irregularidad de Rigidez</i>	84
Tabla 36 <i>Irregularidad Geométrica</i>	84
Tabla 37 <i>Irregularidad Torsional</i>	84
Tabla 38 <i>Irregularidad de Masa</i>	85
Tabla 39 <i>Irregularidad de Rigidez</i>	85
Tabla 40 <i>Irregularidad Geométrica</i>	85
Tabla 41 <i>Desplazamiento total</i>	88
Tabla 42 <i>Cortante de entrepiso</i>	89
Tabla 43 <i>Cortante en la base</i>	89
Tabla 44 <i>Derivas de entrepiso</i>	90
Tabla 45 <i>Aceleraciones</i>	92
Tabla 46 <i>Comparación de Derivas: Modal Espectral 500 años</i>	93
Tabla 47 <i>Comparación de Derivas: Modal Espectral 2500 años</i>	94
Tabla 48 <i>Comparación de Derivas: Tiempo Historia 2500 años</i>	96
Tabla 49 <i>Comparación de Cortante Superestructura: Modal Espectral 500 años</i>	97
Tabla 50 <i>Comparación de Cortante Superestructura: Modal Espectral 2500 años</i>	98
Tabla 51 <i>Comparación de Cortante Superestructura: Tiempo Historia 2500 años</i>	99

Tabla 52 <i>Comparación de Cortante en la Base</i>	101
Tabla 53 <i>Comparación de Aceleraciones de Entrepiso: Modal Espectral 500 años</i>	102
Tabla 54 <i>Comparación de Aceleraciones: Modal Espectral 2500 años</i>	103
Tabla 55 <i>Comparación de Aceleraciones: Tiempo Historia 2500 años</i>	104

LISTA DE SÍMBOLOS Y NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción
AB	Área encerrada del ciclo histerético
Ac	Área de la columna
b	Dimensión menor de la proyección en planta
BM	Factor de amortiguamiento efectivo
C	Factor de amplificación sísmica
C b	amortiguamiento del sistema de aislación
C cr	Amortiguamiento crítico
CM	carga muerta
CV	Carga viva
D	Desplazamiento de diseño del aislador
DBE	Sismo Base de Diseño
DM	Desplazamiento traslacional en el centro de rigidez
D'm	Desplazamiento en el centro de rigidez
DTD	Desplazamiento total de diseño
DTM	Desplazamiento total máximo
Dy	desplazamiento de fluencia
e	espesor de losa
e+	Excentricidad
f'c	Resistencia a la rotura por compresión a los 28 días
Fmax	Fuerza máxima
Fy	fuerza de fluencia
fr	Fuerza de restitución lateral
Fy	Fuerza de fluencia
g	Aceleración de la gravedad
h	peralte
H	altura
Ia	Factor de irregularidad en altura
Ip	Factor de irregularidad en planta
K1	Rigidez elástica inicial del aislador
K2	Rigidez postfluencia del aislador
keff	rigidez efectiva
Km	Rigidez del conjunto de aisladores
Ln	luz libre
Mb	Masa de la base aislada
MCE	Sismo Máximo Considerado
Ms	Masa de la superestructura
P	Peso sísmico de la edificación
P servicio	Carga axial por servicio
Pp	Peso propio
Pt	piso terminado

PT	Razón del período traslacional efectivo y rotacional
Q_d	resistencia característica
R	Coefficiente de reducción de la fuerza sísmica
R_o	Coefficiente básico de reducción de fuerzas sísmicas
S	Factor de amplificación del suelo
S_a	Pseudo-aceleraciones
S_a	Aceleración espectral
S_{aM}	Pseudo aceleración para edificio con base aislada
S_d	Desplazamiento traslacional espectral
SMC	Sismo Máximo Considerado
t	espesor
T	Período fundamental
T_b	Período efectivo de aislamiento
T_f	Período rotacional del sistema de aislamiento
TL	Período límite del espectro de diseño
T_M	Periodo objetivo
T_m	Período traslacional del sistema de aislamiento
TP	Período de plataforma del espectro de diseño
$T_{\theta M}$	periodo rotacional
U	Factor de uso o importancia
y	Distancia entre el centro de rigidez
Z	Factor zona
α	Coefficiente de relación entre rigidez postfluencia y elástica
β_{eff}	Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento
ΔY	Desplazamiento de fluencia del aislador
η	eta
λ	landa
ξ_{eq}	Amortiguamiento equivalente

RESUMEN

La presente investigación cuantifica la variación porcentual del comportamiento estructural de un hospital prototipo mediante un análisis comparativo entre un sistema aporticado de base fija y un sistema aporticado con aislamiento sísmico en la base, bajo las condiciones geotécnicas de un perfil de suelo tipo S2 en la Zona Sísmica 3. La problemática identificada en los hospitales de Cajamarca radica en su comportamiento estructural desfavorable ante eventos sísmicos, presentando elevados niveles de aceleración de piso que comprometen los componentes no estructurales y el equipamiento médico crítico, poniendo en riesgo la continuidad operativa durante y tras un evento sísmico. La metodología es de tipo aplicada con nivel descriptivo; los parámetros geotécnicos se obtuvieron de un Estudio de Mecánica de Suelos (EMS) del hospital Simón Bolívar, desarrollándose seis modelos de análisis: Modal Espectral con Base Fija con periodo de retorno de 500 años, Modal Espectral con Base Fija con periodo de retorno de 2500 años, Tiempo Historia con base fija con periodo de retorno de 2500 años, Modal Espectral con Base Aislada con periodo de retorno de 500 años, Modal Espectral con Base Aislada con periodo de retorno de 2,500 años, y Tiempo Historia con Base Aislada con periodo de retorno de 2,500 años; ejecutándose los modelos de Tiempo historia con ocho pares de registros sísmicos reales escalados al espectro objetivo; el sistema de aislamiento basal se modeló con 88 aisladores de núcleo de plomo. Las variables cuantificadas en el análisis comparativo entre el sistema de base fija y el sistema de base aislada fueron la cortante de entrepiso, las derivas de entrepiso y las aceleraciones de piso. Los resultados demuestran que el sistema de aislamiento sísmico varía positivamente el comportamiento estructural en las tres variables evaluadas: la fuerza cortante se reduce hasta en un 90.04%, las aceleraciones de piso se mitigan hasta en un 90.55% y las derivas de entrepiso se controlan hasta en un 93.78%. Estos valores se mantienen dentro de los límites normativos establecidos por la Norma técnica peruana E.030 (2018) y E.031 (2019) en todos los modelos aislados, incluso bajo el Sismo Máximo Considerado de 2,500 años, confirmando que el sistema mantiene la superestructura dentro del rango elástico y garantiza la continuidad operativa de la edificación ante eventos sísmicos severos.

Palabras clave: Comportamiento estructural, aislamiento sísmico, eventos sísmicos y Zona tipo 3.

ABSTRACT

This research quantifies the percentage variation in the structural behavior of a prototype hospital through a comparative analysis between a fixed-base frame system and a base-isolated frame system, under the geotechnical conditions of a soil profile type S2 in Seismic Zone 3. The problem identified in Cajamarca hospitals lies in their unfavorable structural behavior under seismic events, exhibiting high floor acceleration levels that compromise non-structural components and critical medical equipment, jeopardizing operational continuity during and after a seismic event. The methodology is applied research with a descriptive level; the geotechnical parameters were obtained from a Soil Mechanics Study (SMS) of the Simón Bolívar hospital, developing four analytical models: Modal Spectral with Fixed Base for a 500-year earthquake, Modal Spectral with Isolated Base for a 500-year earthquake, Modal Spectral with Isolated Base for a 2,500-year earthquake, and Time History with Isolated Base for a 2,500-year earthquake, the latter executed with eight pairs of real seismic records scaled to the target spectrum; the base isolation system was modeled with 88 lead-core isolators. The variables quantified in the comparison between the fixed-base system and the base-isolated system were interstory shear force, interstory drift, and floor accelerations. The results demonstrate that the seismic isolation system positively varies the structural behavior across all three evaluated variables: interstory shear force is reduced by up to 90.04%, floor accelerations are mitigated by up to 90.55%, and interstory drifts are controlled by up to 93.78%. These values remain within the normative limits established by NTE E.030 (2018) and NTE E.031 (2019) across all isolated models, even under the Maximum Considered Earthquake of 2,500 years, confirming that the system maintains the superstructure within the elastic range and guarantees the operational continuity of the building under severe seismic events..

Keywords: Structural behavior, Seismic base isolation, seismic events, and Zone type 3.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

La resiliencia de la infraestructura hospitalaria constituye actualmente un eje prioritario en la ingeniería sismorresistente en el Perú. Esta disciplina no solo se orienta a salvaguardar la integridad física de las estructuras, sino a garantizar su operatividad ininterrumpida ante eventos sísmicos severos, tal como lo establecen los lineamientos de gestión de activos críticos (MINSA, 2023). En este contexto, la Norma técnica E.031 (2019) y E.030 (2019) definen los parámetros sísmicos necesarios para asegurar que los establecimientos de salud mantengan su funcionalidad durante y después de una catástrofe, protegiendo tanto la vida humana como la inversión en equipamiento médico especializado.

En el departamento de Cajamarca, ubicado en la Zona Sísmica 3, se identifica una brecha tecnológica crítica, ya que la totalidad de los hospitales en funcionamiento operan bajo sistemas de base fija. Investigaciones recientes, como las publicadas en la revista científica J. PAIME (2025), advierten sobre la presencia de suelos lagunares tipo S2 que amplifican la intensidad sísmica entre un 30% y 50%, incrementando la fragilidad de colapso hospitalario hasta un 25%. Estos hallazgos se complementan con estudios previos Mercado (2017), donde se detectaron derivas de entrepiso superiores a 0.012 en el Hospital Regional de Cajamarca, evidenciando un comportamiento estructural que supera los límites normativos y pone en riesgo la continuidad del servicio de salud.

Ante esta problemática, la presente investigación de tipo aplicada y enfoque cuantitativo, desarrolla un análisis comparativo integral entre un sistema de base fija y uno de base aislada. Mediante un método hipotético-deductivo que emplea el análisis Tiempo-Historia con ocho pares de registros sísmicos reales, se busca corroborar que la implementación de aisladores elastoméricos reduce la cortante de entre piso entre un 60% a 80%, las aceleraciones de piso entre un 70% a 90% y en derivas en más de un 50 %. De esta manera, el estudio proporciona evidencia cuantitativa para asegurar que la superestructura se mantenga en el rango elástico, estableciendo un marco técnico que reafirma al aislamiento sísmico como la solución indispensable para la operatividad hospitalaria.

1.1. Planteamiento del problema

Perú se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, una región de alta peligrosidad sísmica donde la ingeniería actual busca no solo la seguridad estructural, sino la resiliencia funcional. Este enfoque tiene como objetivo garantizar servicios de salud ininterrumpidos ante sismos de gran magnitud, conforme a los lineamientos de gestión de activos críticos (MINSA, 2023). Bajo este marco, la Norma Técnica E.030 (2018) establece los requisitos mínimos para el diseño sismorresistente, mientras que la Norma E.031 (2019) exige obligatoriamente el uso de sistemas de aislamiento sísmico para establecimientos de salud del sector público y privado situados en las zonas sísmicas 3 y 4. El cumplimiento de estas normas es vital para que la infraestructura esencial pase de una protección básica de la vida a una garantía de operatividad post-evento.

En el departamento de Cajamarca, la realidad operativa evidencia una brecha tecnológica alarmante: de los siete hospitales actualmente en funcionamiento pleno, todos operan bajo sistemas convencionales de base fija y carecen de dispositivos de protección sísmica. Esta situación se agrava al considerar que la ciudad se ubica en la Zona Sísmica 3 sobre suelos tipo S2. Investigaciones especializadas (J. PAIME, 2025; UNI, 2023) señalan que los suelos lagunares de la zona amplifican la demanda sísmica entre un 30% y 50%, incrementando la fragilidad de colapso entre un 15% y 25%. Estudios locales previos, como el de Mercado (2017) en el Hospital Regional de Cajamarca, corroboran esta vulnerabilidad al reportar derivas de entrepiso superiores a 0.012, lo que excede los límites de la E.030 y expone a la infraestructura a daños estructurales medianos y daños no estructurales severos debido a las altas aceleraciones de piso.

A pesar de la exigencia normativa de la E.031 (2019), persiste en la región una carencia de evidencia cuantitativa local que demuestre la magnitud exacta de la mejora en el comportamiento estructural de las condiciones geotécnicas específicas de Cajamarca. El problema reside en el limitado conocimiento documentado sobre la eficiencia real de los sistemas de protección en este contexto de suelo lagunar y silencio sísmico. Por tanto, resulta exigente establecer un marco de validación técnica mediante el uso de registros sísmicos reales y análisis Tiempo-Historia. Esta investigación busca llenar ese vacío técnico, cuantificando cómo el aislamiento basal reduce la demanda sísmica y asegura que la superestructura se mantenga en el rango elástico, protegiendo así el equipamiento médico crítico.

1.1.1. Formulación del problema

¿Cuánto es la variación porcentual de la respuesta estructural, al comparar un sistema de base fija frente a uno sistema con base aislada, en Zona 3 y suelo S2, según las exigencias de la Norma técnica E.031?

1.1.2. Hipótesis general de investigación

El sistema con aislamiento sísmico en la base varía positivamente la respuesta estructural de un hospital prototipo, reduciendo la cortante de entrepiso entre 60% a 80%, las aceleraciones de piso entre 70% y 90% y las derivas de entrepiso en más del 50%, garantizando el comportamiento elástico de la superestructura conforme a los requisitos establecidos por la Norma Técnica E.031 (2019).

1.2. Justificación de la investigación

Esta investigación se justifica por la necesidad técnica de cuantificar la variación en la respuesta dinámica que se obtiene al implementar sistemas de aislamiento sísmico frente a las estructuras convencionales de base fija. En el departamento de Cajamarca, la infraestructura hospitalaria actual carece de aislamiento sísmico, operando bajo sistemas con base fija. Por ello, el aporte fundamental de esta tesis radica en generar un marco de validación técnica que determine con precisión el grado de mejora en el comportamiento estructural de la edificación bajo las condiciones geotécnicas específicas de la Zona 3 y suelo tipo S2. El estudio proporciona una base de datos cuantitativa sobre la reducción de la demanda sísmica, sirviendo como evidencia técnica para que los nuevos proyectos de inversión pública y privada en la región integren esta tecnología. Al evaluar la variación de parámetros críticos como la cortante y las aceleraciones de piso, la investigación se constituye como una herramienta de toma de decisiones para proyectistas y entidades gubernamentales. El uso de este conocimiento permitirá alinear el desarrollo de la infraestructura de salud local con las exigencias de la Norma técnica E.031 (2019), cerrando la brecha tecnológica existente en Cajamarca.

1.3. Alcances y delimitación de la investigación

El alcance abarca al análisis comparativo del comportamiento de un hospital prototipo de cuatro niveles, ubicado para zona sísmica 3, empleando las propiedades mecánicas de un suelo tipo S2 obtenidas del Estudio de Mecánica de Suelos (EMS) del hospital Simón Bolívar; dicho estudio se delimita a la evaluación de dos configuraciones estructurales diferenciadas: una de un sistema aporticado para la condición de base fija y un sistema aporticado con 88 aisladores para la condición aislada. La investigación

contempla los análisis modales espectrales y análisis tiempo-historia, para el cual se procesan y compatibilizan espectralmente ocho pares de registros sísmicos peruanos reales (Lima 1966, 1970, 1974, Ica (Pisco) 2007, Ancash (Chimbote) 1970, Arequipa (Ocoña) 2021, Moquegua 2021 y San Martín (Moyobamba) 2005), con diversidad de características espectrales, magnitudes y distancias epicentrales, garantizando un análisis robusto, permitiendo así cuantificar con precisión la variación en la cortante de entrepiso, derivas de entrepiso y aceleraciones, bajo los lineamientos de la Norma E.031 (2019).

1.4. Limitaciones

La presente investigación no contempla el análisis de interacción suelo-estructura, con el propósito de centrar la comparación exclusivamente en la eficacia del sistema de aislamiento sísmico. Asimismo, la evaluación se limita al rango de comportamiento elástico de los elementos de concreto armado, omitiendo el análisis del comportamiento inelástico de la superestructura, debido a que el objetivo principal es verificar el comportamiento estructural. En ese mismo sentido, el análisis de historia de tiempo en el modelo de base fija se desarrolló sin considerar la no linealidad de los elementos estructurales. Adicionalmente, para mantener condiciones comparables entre el sistema de base fija y el sistema con aislamiento sísmico, se adoptó un factor de reducción sísmica $R = 1$, priorizando un comportamiento elástico uniforme durante la evaluación estructural.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Comparar el comportamiento estructural de un hospital prototipo con un sistema de base fija y un sistema de base aislada, según la Norma Técnica Peruana E.031.

1.5.2. Objetivos específicos

- Determinar las demandas sísmicas de la estructura de base fija y base aislada, como son: cortante de entrepiso, derivas de entrepiso y aceleraciones.
- Evaluar el comportamiento del sistema de aislamiento mediante aisladores, cuantificando la reducción de la fuerza cortante, aceleraciones y el control de las derivas de entrepiso.

1.6. Descripción de los contenidos

- **Capítulo I: Introducción:** Comprende el planteamiento del problema, formulación del problema, la hipótesis, la justificación de la investigación, los alcances y delimitación de la investigación, limitaciones, objetivos y la descripción de contenidos.
- **Capítulo II: Marco Teórico:** Comprende los antecedentes teóricos, a nivel internacional, nacional y local, también se detalla las bases teóricas que sirven como base para el desarrollo de la investigación y la definición de términos básicos.
- **Capítulo III: Materiales y Métodos:** Comprende la ubicación geográfica y ubicación temporal en el cual se llevó a cabo la investigación, se explica la metodología empleada, el procedimiento utilizado, un análisis y tratamiento de datos y finalmente se presentan los resultados.
- **Capítulo IV: Análisis y Discusión de resultados:** Comprende el análisis y discusión de los resultados de la investigación, luego de aplicar la metodología propuesta.
- **Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones:** Comprende las conclusiones a las que se ha llegado luego de analizar los resultados de la investigación y en base a los objetivos planteados, además se incluye recomendaciones para próximas investigaciones.
- **Referencias Bibliográficas:** Es la lista de fuentes bibliográficas tanto como fuentes digitales como fuentes físicas que se han utilizado a lo largo de la investigación
- **Anexos:** Información complementaria como el estudio de mecánica de suelos.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes teóricos

2.1.1. Internacionales

Astroza M. (2019) en su artículo denominado: "Evaluación del desempeño sísmico de hospitales de base aislados y convencionales mediante análisis de fragilidad", presentado en el XII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica; realiza un análisis comparativo de un hospital de base aislada con uno de base convencional. Para los sistemas convencionales se utilizan muros de corte, y para sistemas aislados emplean pórticos con dispositivos de aislamiento sísmicos en la base. Evaluando el comportamiento mediante análisis de fragilidad, con la norma chilena NCh2745, da como resultado que los hospitales convencionales con muros de corte presentan mayor rigidez lateral y exige aislamiento sísmico para hospitales públicos nuevos.

Ruiz C. (2018) en su tesis denominada: "Análisis Comparativo del Comportamiento Sísmico de Estructuras Esenciales con Aisladores de Base del Tipo Elastoméricos con Núcleo de Plomo LRB y Disipadores Tipo Contraventeos Restringidos al Pandeo BRB", realiza un análisis comparativo de un hospital con sistema estructural dual de 7 niveles compuesto por 2 bloques, con áreas de 7,738.12 m² y de 9,975.43 m², ubicado en la ciudad de Manta, Ecuador (zona de alta sismicidad). Se procedió a comparar tres sistemas: de base fija, aislado con LRB y con disipadores BRB. Utilizando metodología de análisis tiempo-historia no lineal y registros sísmicos y conforme a normativas NEC-2015 (Ecuador), ASCE 7-16, ASCE 41-13 y AISC 341-16. La comparación de resultados entre sistemas de: desplazamientos, derivas de entrepiso, energía del sistema, comportamientos histeréticos y niveles de desempeño; muestran reducciones significativas en la disipación de energía y control de derivas de entrepiso.

Cote et al. (2017) en su investigación denominada: "Monitoreo sísmico de dos hospitales aislados sometidos al sismo de Illapel 2015", realizó el monitoreo acelerométrico de dos hospitales de 6 pisos (72,812 tonf) con aisladores LRB, sobre suelos tipo C y D en la ciudad de Chile. Concluyendo que existe una reducción de aceleraciones horizontales entre 35% y 70%, aceleración vertical de 80.9% , con desplazamientos mínimos de 5 a 21 mm, con periodo fundamental de hasta 1.74s, permitiendo así disminuir las derivas de entrepiso de 2 a 7 veces; confirmando la

protección de contenidos médicos y equipos sensibles, asegurando la continuidad operativa post sismo.

Urizar (2016) en su tesis denominada: "Comparación del comportamiento estructural de edificación de concreto, utilizando aisladores elastoméricos en la base", presenta un análisis comparativo de un hospital de 5 niveles ubicado en zona 16 de Guatemala (alta sismicidad), con un tipo de suelo tipo D (muy denso o roca suave). La estructura tiene un peso sísmico de 8,625.74 toneladas y no presenta irregularidades. Para lo cual utilizó 48 aisladores elastoméricos marca Bridgestone, dando como resultado reducciones de: cortante 64.63% respecto a estructura fija; disminución de derivas de entrepiso hasta 78% en niveles superiores; reducción de momentos máximos de 45.7%; y un incremento del periodo fundamental de 50% (de 1.552 s a 2.330 s). Para lo cual se utilizaron las normas AGIES NSE-2010 (Guatemala) y ASCE 7-10 (capítulo 17 de aislamiento sísmico).

2.1.2. Nacionales

Bernardo Zevallos (2024) en su tesis denominada: "Análisis y diseño sísmico comparativo entre aisladores LRB y disipadores histeréticos aplicados en un edificio hospitalario", realizó un análisis comparativo de un hospital aporticado de 3 niveles; en una zona sísmica 3, suelo S3; entre un sistema de base fija y un sistema de base aislada. El edificio es una estructura regular, con un peso total de 2854.30 ton, para el cual se emplearon 17 aisladores LRB y 8 deslizadores planos, dando como resultado un incremento del periodo fundamental de 0.562s a 2.343s, lo que permitió una reducción de las derivas inelásticas de entrepiso del 70.7% y 73.1%, los aisladores LRB absorbieron entre 93.12% y 93.33% de la energía sísmica total, logrando mantener las aceleraciones máximas entre 0.58g y 0.60g, garantizando la protección de elementos no estructurales y la continuidad operativa, para lo cual hicieron uso de las NTE E.030, E.031 y E.060

Aguirre Herrera y Vidal Barazorda (2022) en su tesis denominada "Propuesta de diseño de dos hospitales, en zona sísmica tres y cuatro, usando disipadores SLB en el Perú; como alternativa a los aisladores sísmicos exigidos por la NTE E.030", evaluaron el desempeño de dos hospitales ubicados en Puno y Lima. El primer hospital Ilave, con 3 niveles, en zona sísmica 3, suelo S2, y el segundo la Torre INEN, de 9 pisos y 3 sótanos en zona sísmica 4 suelo S1. Ambos proyectos presentan una estructura regular de pórticos, emplean aisladores LRB y deslizadores planos. Dando como resultado el incremento del periodo fundamental de un rango de 0.535s a 2.94s y de 2.009s a 3.955s respectivamente,

logrando así una disipación de energía sísmica de 32% y 66%, aceleraciones máximas de 0.204g y 0.286g y derivas de entrepiso máximas de 0.0025 y 0.0046, valores inferiores al límite de 0.005 exigido para el análisis tiempo-historia. Asegurando así la funcionalidad continua y protección de equipos médicos. Haciendo uso de las normas: NTE E.030, NTE E.031.

Rodríguez Jaramillo (2019) en su tesis denominada "Diseño de un edificio hospitalario con aislamiento sísmico de base", realizó el diseño estructural de un hospital de 7 niveles con sistema aporticado en zona sísmica 4, suelo S1; con un peso total de 9223 ton. La estructura presentaba irregularidad torsional en base fija, la cual fue mitigada mediante un sistema de aislamiento compuesto por 36 aisladores HDRB y 4 deslizadores planos. Haciendo uso de las normas E.030, E.031, E.060 y E.020, dan como resultado una reducción de la cortante del 54%; derivas inelásticas máximas de 0.00432, manteniéndose bajo el límite de 0.005; aceleraciones de 0.30g; y el incremento del periodo fundamental de 1.27s (base fija) a 3.93s (nominal).

Norabuena (2019) en su tesis denominada: "Diseño estructural con y sin aisladores sísmicos de un pabellón de tres pisos: Colegio Juan Bautista de la Salle, Yungay 2018", realiza un análisis comparativo entre un sistema de base fija y uno de base aislada, en una institución educativa de 3 niveles, con sistema aporticado, ubicado en una zona sísmica 4, suelo S1. En la estructura aislada se emplearon 10 aisladores elastoméricos. Dando como resultado reducción significativas de: cortante del 47.77% (eje X) y 34.40% (eje Y); en momentos flectores máximos del 22.08% y cortantes máximos del 16.33%; y un incremento del periodo fundamental del 20.68% (eje X) y 28.04% (eje Y). El análisis y diseño cumple con las normativas E.030 Diseño Sismorresistente, E.031 Aislamiento Sísmico y E.060 Concreto Armado del Reglamento Nacional de Edificaciones.

Portillo Cazorla (2019) en su tesis denominada "Diseño de un hospital con aislamiento sísmico según la normativa peruana", realizó un análisis y diseño de un hospital sin irregularidades de 4 niveles con sistema aporticado ubicado en la zona sísmica 3, suelo S2, con un peso total de 4285 ton; para el cual se emplea un sistema LRB y deslizadores planos. Haciendo uso de las normas E.020, E.030, E.031 y E.060, dan como resultado el incremento del periodo fundamental de 0.77s (base fija) a 3.45s (nominal), (4.48 veces), desplazamiento máximo de 28 cm, reducciones de derivas de entrepiso de entre 0.0021 y 0.003.8, debajo del límite normativo de 0.005 para tiempo historia y las

aceleraciones en un rango de 0.18g a 0.25g, asegurando así la protección de contenidos médicos y la continuidad operativa.

Yucra Ayala (2018) en su tesis denominada "Evaluación del desempeño sísmico de hospitales aislados en el Perú", realizó un análisis del comportamiento sísmico del Hospital Regional de Moquegua con una estructura sin irregularidades y un sistema dual con un peso de 7216.33 ton, la cual presenta 4 niveles, ubica en la zona 4, suelo S2. Se usó 33 aisladores HDRB y 8 deslizadores planos. Haciendo uso de las normas: E.020, E.030 E.031, dan como resultado el incremento del periodo de 0.83s a 3.38s (4.07 veces) y funcionando con un amortiguamiento del 15%; y reducciones significativas de las derivas de entrepiso del 82% y 70%, las aceleraciones van entre 0.18g a 0.22g, garantiza la protección de contenidos médicos sensibles.

2.1.3. Locales

Zegarra Araujo (2015) en su tesis "Análisis Comparativo del Comportamiento Estructural de una Edificación Hospitalaria con Aislación y sin Aislación Sísmica de Base", centra su investigación en el hospital regional de Cajamarca, realizando un análisis comparativo entre la respuesta sísmica de un sistema de base fija y un sistema de base aislada, mediante el programa ETABS, según la norma ASCE 7-10, realiza el análisis con el espectro de respuesta de la norma E.030 y con registros de sismos reales. Dando como resultados que el edificio con aislamiento sísmico, usando aisladores LRB, redujo el desplazamiento lateral en un 2% a 51%, la aceleración por piso en un 60% a 93%, y la fuerza cortante en un 75% a 93% en comparación con el edificio convencional. Concluyendo así que el uso de aisladores sísmicos en la base mejora significativamente la respuesta sísmica y la seguridad de los edificios hospitalarios, asegurando su operatividad después de eventos sísmicos.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Principales teorías en el análisis y comportamiento estructural

2.2.1.1 El período de la estructura

Según la Norma Técnica E.030 (2019), es el tiempo que tarda la estructura en completar un ciclo completo de oscilación libre bajo su frecuencia natural de vibración. Este parámetro está directamente relacionado con la masa y la rigidez de la estructura: a mayor masa, el período aumenta, y a mayor rigidez, el período disminuye. Las estructuras rígidas presentan períodos cortos y respuestas más rápidas, mientras que las estructuras flexibles tienen períodos largos y oscilaciones más lentas. En sistemas de aislamiento sísmico, el aumento de la masa contribuye a la estabilidad de los aisladores. Por ello, los aisladores elastoméricos resultan especialmente efectivos en edificaciones pesadas, como hospitales.

2.2.1.2 Comportamiento de estructuras sin aislamiento

La Norma Técnica E.030 (2019) describe que las estructuras de base fija responden directamente al movimiento del suelo, experimentando amplificaciones significativas de aceleraciones y fuerzas internas durante eventos sísmicos. El diseño sismorresistente tradicional se fundamenta en tres principios esenciales: resistencia, ductilidad y capacidad de disipación de energía frente a acciones sísmicas. En este marco, Paz y Leigh, en *Dinámica estructural: teoría y cálculo* (2004), aportan un enfoque metodológico al integrar análisis estático y dinámico mediante ejemplos prácticos que facilitan la comprensión de la respuesta estructural ante cargas dinámicas. Asimismo, Booth, en *Edificios de concreto en regiones sísmicas* (1994), profundiza en el comportamiento sísmico de las estructuras de concreto armado, destacando la importancia de la ductilidad, el adecuado confinamiento del concreto y los detalles constructivos para evitar fallas frágiles. Complementariamente, la Norma Técnica Peruana E.030 establece los requisitos de diseño sismorresistente, definiendo los espectros de diseño en función de la zona sísmica, las características del suelo y los parámetros de respuesta estructural.

2.2.1.3. La flexibilidad y la amortiguación

Chopra (2020) explica que la flexibilidad estructural permite deformaciones controladas mientras el amortiguamiento viscoso o histerético disipa energía cinética, reduciendo las amplitudes de vibración máxima. El aumento de la flexibilidad permite alargar el período natural de vibración y reducir las aceleraciones y fuerzas sísmicas transmitidas a la superestructura. El cual debe complementarse con amortiguación, la cual disipa la energía sísmica y controla los desplazamientos del sistema aislado.

2.2.1.4. Amortiguación y disipación de energía

Chopra (2020), indica que los mecanismos de amortiguación convierten la energía sísmica en calor mediante fricción interna o deformación plástica, limitando las respuestas dinámicas de la estructura. Es decir la amortiguación ayuda a disipar la energía mecánica generada por el movimiento del suelo, los sistemas de aislamiento típicos alcanzan niveles de amortiguación óptimos mediante la histéresis del material (en elastómeros y núcleos de plomo) o la fricción (en sistemas deslizantes). La disipación de energía en estos sistemas sigue una curva fuerza-desplazamiento característica, la cual puede ser bilineal o perfectamente plástica. En general, la capacidad de amortiguación disminuye a medida que el desplazamiento aumenta, lo que puede ser un desafío en eventos sísmicos severos.

2.2.1.5. Modelos de análisis estructural

Clough y Penzien (2019) establecen que los modelos estructurales aproximan el comportamiento real mediante ecuaciones diferenciales que predicen desplazamientos, fuerzas y momentos internos.

Tabla 1*Descripción de los diferentes métodos de análisis sísmico*

Método de análisis sísmico	Descripción y aplicación	Ventajas	Cuando utilizarlo
Método estático equivalente	Simplifica la acción sísmica como una fuerza estática horizontal aplicada en cada nivel de la estructura.	Sencillo y rápido de aplicar.	ASCE 7-16 Límite de 4 pisos sobre el sistema de aislación Norma Peruana E.031: Límite de 20 metros de altura
		Ideal para edificios regulares y de baja altura.	Para estructuras sencillas.
Análisis modal espectral	Considere los modos de vibración de la estructura, usando espectros de respuesta para estimar las fuerzas sísmicas.	Permite obtener una respuesta más precisa que el método estático.	Estructuras medianas a altas, especialmente con cierta irregularidad.
		Ideal para estructuras medianas.	Cuando se necesita precisión.
Análisis Tiempo-Historia	Simula el comportamiento de la estructura bajo registros de sismos históricos o artificiales en el tiempo.	Altamente preciso.	Estructuras críticas y esenciales (hospitales, centrales).
		Evalúa el comportamiento y el daño.	Edificaciones altas o con aislamiento sísmico.

2.2.1.6. Desplazamiento del edificio aislado

La Norma Técnica E.031 (2019) define el desplazamiento del edificio aislado como el movimiento relativo máximo entre la superestructura y la base. Los desplazamientos máximos permitidos durante un evento sísmico tienen que cumplir que los elementos verticales del sistema de aislamiento, como los aisladores que soportan cargas, deben ser capaces de resistir estos desplazamientos sin perder su estabilidad.

2.2.1.7. Comportamiento dinámico de la estructura aislada

Según la Norma Técnica E.031 (2019), el aislamiento sísmico alarga el período fundamental y aumenta el amortiguamiento efectivo, desacoplando la estructura del movimiento sísmico.

2.2.1.7.1 Modelo de un grado de libertad (1 GDL).

Chopra (2020) presenta el modelo 1 GDL como un sistema masa-resorte-amortiguador que idealiza el comportamiento dinámico dominante de la estructura bajo

carga sísmica. Por lo que el modelo de un grado de libertad representa al sistema aislado mediante una masa concentrada equivalente al peso total de la superestructura y un conjunto de resortes y amortiguadores que modelan el sistema de aislamiento, asumiendo que la rigidez de la superestructura es mucho mayor que la del aislamiento ($k_s \gg k_b$). Es decir, la superestructura se considera rígida y el edificio se desplaza lateralmente como un solo bloque, por lo que el desplazamiento en la base es igual al de la parte superior. Este modelo es ampliamente utilizado en etapas preliminares de diseño por su simplicidad y eficiencia para estimar desplazamientos y fuerzas máximas en los aisladores; sin embargo, presenta limitaciones al no considerar deformaciones de la superestructura ni efectos torsionales en edificaciones altas o asimétricas.

2.2.1.7.1.1 Parámetros dinámicos del sistema aislado

La Norma Técnica E.031 (2019) requiere calcular período efectivo, rigidez efectiva y amortiguamiento equivalente para caracterizar completamente el sistema de aislamiento sísmico, por lo cual se procede a ver las propiedades del sistema de aislamiento:

2.2.1.7.1.1.1 Propiedades dinámicas del sistema de aislamiento

San Martín (2022) caracteriza las propiedades dinámicas del sistema de aislamiento sísmico mediante la rigidez, el amortiguamiento y estabilidad rotacional de los aisladores bajo carga sísmica.

Rigidez del sistema (Km)

La resistencia lateral del sistema, la cual varía dependiendo del período y de la masa

$$k_m = 4\pi^2 * \frac{(m_s + m_b)}{T_b^2} \quad \dots\dots (1)$$

Amortiguamiento crítico (Ccr)

Es el valor teórico mínimo, el cual sirve para que la estructura se regrese a su posición de origen, sin que se produzca alguna oscilación.

$$C_{cr} = 2 * \sqrt{(m_s + m_b) * K_m} \quad \dots\dots (2)$$

Amortiguamiento del sistema de aislación (Cb)

Controla la amplitud de oscilación y la energía disipada, con el fin de limitar los máximos desplazamientos; pues el edificio puede oscilar mucho y golpear los

bordes sísmicos, y en caso se sobre estime, el sistema se vuelve más rígido y no es tan eficiente el aislamiento sísmico

$$C_b = \xi_{eq} * C_{cr} \quad \dots\dots (3)$$

Factor de amortiguamiento (Bm)

Sirve para ajustar los espectros de diseño en función del nivel de amortiguamiento efectivo, lo cual permite ajustar las fuerzas sísmicas de diseño considerando los efectos de la disipación de energía proporcionada por los sistemas de amortiguamiento o aislamiento, esto es importante porque a un mayor amortiguamiento reduce la demanda sísmica en la estructura.

Tabla 2

Factor de amortiguamiento BM

Amortiguamiento Efectivo, β_M (En porcentaje del amortiguamiento crítico) a,b	Factor BM
≤ 2	0,8
5	1,0
10	1,2
20	1,5
30	1,7
≥ 40	1,9

Nota. Norma Técnica E.031 página 27

2.2.1.7.2 Modelo de dos grados de libertad (2 GDL)

Chopra (2020) modela el sistema aislado con 2 GDL, separando el movimiento de la base flexible del desplazamiento relativo de la superestructura rígida. El modelo de dos grados de libertad representa de forma más realista el comportamiento dinámico de edificaciones con aislamiento sísmico, considerando dos masas diferenciadas: una asociada a la superestructura y otra al sistema de aislamiento o nivel de base. Este modelo permite capturar tanto el movimiento relativo entre la superestructura y la base aislada como la interacción dinámica entre ambos sistemas, incorporando rigideces y amortiguamientos independientes. Su principal ventaja es que permite evaluar con mayor precisión las aceleraciones en la superestructura, los desplazamientos en los aisladores y la transferencia de fuerzas, siendo especialmente adecuado para análisis más detallados y para edificaciones donde la superestructura no puede considerarse completamente rígida.

2.2.2 Aspectos normativos

2.2.2.1. Desplazamiento del sistema de aislación

Según la Norma Técnica E.031 (2019) establece que el desplazamiento del sistema de aisladores debe verificarse contra límites permisibles para garantizar estabilidad y funcionalidad sísmica.

2.2.2.1.1. Razón entre periodo traslacional y rotacional efectiva

Según la Norma Técnica E.031 (2019), la razón debe mantenerse menor a 1.0 para evitar inestabilidad torsional en la interfaz de aislamiento sísmico. El periodo traslacional T_m (s) es obtenido por el análisis dinámico extraído del Etabs, antes rigidizando la estructura para cada dirección con el fin de poder determinar el valor exacto

$$\rho_T = \frac{T_M}{T_{\theta M}} \quad \text{..... (4)}$$

2.2.2.1.2. Desplazamientos laterales relativos

Según la Norma Técnica E.030 (2019), los desplazamientos laterales relativos entre pisos consecutivos representan la diferencia de movimiento entre dos niveles de la estructura ante sollicitaciones sísmicas, incorporando tanto la traslación directa como los efectos torsionales. La norma establece límites máximos para estos desplazamientos con la finalidad de prevenir daños progresivos en elementos estructurales y no estructurales. Los valores obtenidos del análisis lineal tienen que amplificarse mediante factores que dependen de la regularidad estructural y del coeficiente de reducción sísmica R adoptado en el diseño:

- Para edificios regulares se multiplica por $0.75R$
- Para edificios irregulares por $0.85R$.

2.2.2.1.3. Desplazamiento total DTM

Según la Norma Técnica E.031 (2019) define DTM como la combinación vectorial del desplazamiento traslacional más los efectos rotacionales en la interfaz de aislamiento. El cual sirve para diseñar la junta sísmica, el cual se calcula amplificando el desplazamiento traslacional DM mediante factores que consideran excentricidades y radio de giro; varía según la posición del aislador en planta, siendo máximo en las esquinas más alejadas del centro de rigidez.

$$D_{TM} = \frac{D_{TM}}{D_M} * S_d \quad \text{..... (5)}$$

Cálculo del desplazamiento total

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \left(\frac{12e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad \text{..... (6)}$$

2.2.2.1.4. Desplazamiento traslación (D'_{TM})

Según la Norma Técnica E.031 (2019), D'_{TM} representa únicamente el componente traslacional puro del desplazamiento máximo en el centro de rigidez. Representa la deformación horizontal máxima experimentada por los dispositivos de aislamiento durante un evento sísmico. Este valor considera únicamente el movimiento traslacional puro del sistema y excluye explícitamente cualquier desplazamiento adicional generado por efectos torsionales, tanto los derivados de la torsión natural (debido a la no coincidencia entre el centro de masa y el centro de rigidez) como los producidos por la torsión accidental (que contempla las incertidumbres en la distribución de masas y en la rigidez de la estructura)

$$D'_{TM} = \frac{D_{TM}}{D_T} * D'_M \quad \text{..... (7)}$$

2.2.2.1.5. Relación entre desplazamiento total y traslacional en la dirección principal

Según la Norma Técnica E.031 (2019) relaciona DTM y D'_{TM} considerando excentricidades accidentales y distribución de rigidez en direcciones ortogonales principales. Esta relación mínima de 1.15 establecida por la norma E.031 garantiza que se consideren adecuadamente los efectos torsionales incluso en sistemas aparentemente simétricos, protege contra subestimaciones por incertidumbres en masa y rigidez, y se verifica dividiendo el desplazamiento total DTM (que incluye torsión y excentricidad accidental) entre el desplazamiento traslacional puro DM

$$\frac{D_{TM}}{D_M} = \frac{1 + 12 * y * e}{\rho_T * (Lx^2 + Ly^2)} \geq 1.15 \quad \text{..... (8)}$$

2.2.2.2. Junta sísmica y separación de edificios

Según la Norma Técnica E.030 (2019) exige la separación mínima de seguridad entre edificaciones adyacentes, cuyo objetivo es evitar el contacto o golpeteo durante un sismo, fenómeno que puede generar daños severos. Esta separación debe verificarse en todo el perímetro de la edificación, siendo especialmente crítica en estructuras con aislamiento sísmico, donde debe permitir el desplazamiento total máximo del sistema (DTM).

La Norma E.031, art. 23. establece que la separación debe permitir el libre desplazamiento del sistema de aislamiento durante el Sismo Máximo Considerado (SMC)

- Para estructuras aisladas con convencionales: Separación $\geq$ DTM (Desplazamiento Total Máximo)
- Entre estructuras aisladas: Separación $\geq$ suma de sus respectivos DTM
- Con respecto a los límites de propiedad: Separación $\geq$ DTM + los requisitos de la E.030 ($s = 0.006h \geq 0.03\text{m}$)

La junta sísmica según la norma E 030, cap. 5, art. 33, es la distancia de seguridad que previene el contacto entre dos estructuras adyacentes durante un sismo. La cual debe de cumplir lo siguiente:

- $s = 0.006 \times h$ (h es la altura)
- $s \geq 0,03 \text{ m}$ (mínimo 3 cm)
- $s \geq 2/3 \times$ (suma de desplazamientos máximos de edificios adyacentes)
- Para predios sin edificaciones vecinas, la separación debe ser al menos 2/3 del desplazamiento máximo o $s/2$ si el edificio colindante futuro considera junta sísmica. En caso el edificio vecino no cuente con junta, la separación se toma como la suma de $s/2$ de cada edificación.
- para edificaciones de mayor altura, la norma establece la Junta sísmica:

$$s = 3 + 0.004(h - 500) \geq 3 \text{ cm} \quad \text{..... (9)}$$

- h = altura mayor de los edificios adyacentes (cm)
- $s \geq 3 \text{ cm}$ (mínimo absoluto)

2.2.2.3. Fuerza de restitución (fr)

La Norma Técnica E.031 (2019) la define como la fuerza necesaria para que los aisladores regresen a su posición inicial después de su desplazamiento. Para ello se tiene que comprobar que la fuerza de restitución tiene que ser mayor que el 2.5% que su peso de la estructura ($F_r \geq 2.5\%$ Peso).

$$F_r = F_M - (Q_d + D_M \frac{K_2}{2}) = D_M \frac{K_2}{2} \quad \text{..... (10)}$$

2.2.2.4. Tipo de análisis

2.2.2.4.1. Análisis modal espectral

Según la Norma Técnica E.030 (2019) para este método se utiliza el espectro de respuesta sísmica y los modos de vibración, para determinar fuerzas y deformaciones durante un sismo. Este análisis tiene tres etapas: determinación de modos de vibración y la obtención de respuestas máximas por modo usando el espectro, y combinación modal mediante métodos SRSS.

2.2.2.4.1.1. Modos de vibración

Chopra (2020) describe los modos de vibración como patrones ortogonales de deformación asociados a frecuencias naturales específicas de la estructura. El cual permite evaluar cómo responde una estructura ante un sismo, considerando tanto su rigidez como la distribución de sus masas, también hay que tener en cuenta que la suma de las masas efectivas tiene que alcanzar al menos el 90% de la masa total de la estructura. Además, es considerar obligatorio los tres primeros modos predominantes, ya que estos reflejan los principales comportamientos de la estructura ante movimientos sísmicos y son esenciales para un diseño seguro.

2.2.2.4.2. Factor de amplificación sísmica “C”

Según la Norma Técnica E.030 (2019) menciona que el factor de amplificación sísmica, está en función del período estructural, parámetros de suelo y tipo de estructura para escalar aceleraciones sísmicas básicas. Sirve para saber en cuanto se amplifica la aceleración de la estructura, con respecto a la aceleración del suelo en su base durante un evento sísmico. Con el fin de poder estimar la magnitud de la respuesta de una estructura, pudiendo indicar que, si el valor de C es alto, la estructura va a tener una mayor amplificación de la aceleración, produciéndose así un diseño más robusto

2.2.2.4.2.1. Edificio de base fija

Según la Norma Técnica E.030 (2019) considera que el factor de amplificación sísmica C representa la amplificación dinámica que experimenta la aceleración sísmica básica zonal en función del período fundamental de la estructura y de los parámetros de sitio T_P y T_L . Este factor define la forma del espectro de pseudo-aceleración de diseño y se calcula de la siguiente manera:

$$T < T_P$$

$$C = 2,5 \quad \text{..... (11)}$$

$$T_P < T < T_L$$

$$C = 2,5 * \left(\frac{T_P}{T} \right) \quad \text{..... (12)}$$

$$T > T_L$$

$$C = 2,5 * \left(\frac{T_P * T_L}{T^2} \right) \quad \text{..... (13)}$$

2.2.2.4.2.2. Edificio de base aislada sísmicamente

Según la Norma Técnica E.031 (2019), menciona que el factor de amplificación sísmica C se modifica para edificios con aislamiento sísmico, dado que el alargamiento del período efectivo del sistema desplaza la respuesta estructural hacia la región de menores demandas espectrales. Como se ve a continuación:

$$T < 0.2 T_P$$

$$C = 1 + 7.5 * \left(\frac{T}{T_P} \right) \quad \text{..... (14)}$$

$$0.2 T_P < T < T_P$$

$$C = 2,5 \quad \text{..... (15)}$$

$$T_P < T < T_L$$

$$C = 2,5 * \left(\frac{T_P}{T} \right) \quad \text{..... (16)}$$

$$T > T_L$$

$$C = 2,5 * \left(\frac{T_P * T_L}{T^2} \right) \quad \text{..... (17)}$$

2.2.2.4.2.3. Excentricidad accidental

La Norma Técnica E.030 (2019) incorpora excentricidad accidental del 5% de las dimensiones para simular incertidumbres en distribución de masas y rigideces. El cual se calcula de la siguiente manera:

- Valor de excentricidad = $\pm 0.05 \times$ Dimensión del edificio perpendicular al sismo
- Se debe analizar en ambos sentidos (+ y -) y usar el más desfavorable
- Se aplica en cada nivel del edificio.

Estas consideraciones son importantes porque: genera momentos torsionales adicionales, considerar las irregularidades constructivas no previstas y toma en cuenta la distribución no uniforme de cargas reales

2.2.2.4.3. Tiempo historia

La Norma Técnica E.031 (2019) exige análisis tiempo-historia para validar resultados de métodos equivalentes en sistemas de aislamiento complejos. El cual sirve para simular la respuesta estructural completa durante un terremoto específico, aplicando registros de acelerogramas, con el fin de calcular desplazamientos, aceleraciones y fuerzas internas a lo largo del tiempo, lo cual captura efectos no lineales y dinámicos complejos, y permite visualizar daño progresivo.

2.2.2.4.3.1. Registros recomendados para el análisis de tiempo historia

Según la Norma E.031 (2019) requiere para el análisis de Tiempo Historia un mínimo de 7 conjuntos de registros de aceleraciones del terreno, cada conjunto de registro debe tener dos componentes en direcciones ortogonales. Los registros deben ser escalados de manera que en el rango de períodos entre $0.20T$ y $1.25T$, teniendo en cuenta que el promedio de los espectros de respuesta no sea menor que el espectro de diseño.

2.2.2.5. Sistemas estructurales

Según la Norma Técnica E.030 (2019) clasifica sistemas como pórticos, muros, duales y especiales según su capacidad disipativa y configuración geométrica vertical. Los pórticos estructurales tienen al menos el 80 % de la fuerza cortante es resistida por las columnas, destacando por su ductilidad, capacidad de disipación de energía sísmica y flexibilidad arquitectónica.

2.2.2.6. Categoría y sistemas estructurales

Según la Norma Técnica E.030 (2019), la selección del sistema estructural está condicionada por la categoría de la edificación, la zona sísmica y la altura de la estructura. De acuerdo con el artículo 15 y la Tabla 6 de dicha norma, las edificaciones de categoría A1 ubicadas en las zonas sísmicas 3 y 4 tienen la obligación de incorporar sistemas de aislamiento sísmico en la base, con la finalidad de garantizar la continuidad operativa y un desempeño estructural adecuado ante sismos severos; mientras que para las zonas sísmicas 1 y 2, la norma admite sistemas convencionales con restricciones específicas según el tipo de estructura

2.2.2.6.1. Sistemas estructurales y coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas “R0”

Según la Norma Técnica E.030 (2019), el coeficiente básico de reducción de fuerzas sísmicas R_0 se asigna en función de la ductilidad intrínseca y la capacidad de disipación de energía de cada sistema estructural, sin considerar los efectos de irregularidad. De acuerdo con el artículo 22 y la Tabla 7 de dicha norma, los sistemas de pórticos estructurales de concreto armado tienen asignado un valor de $R_0 = 8$, reflejando el nivel de ductilidad y redundancia estructural disponible. Complementariamente, la Norma Técnica E.031 (2019) establece que para edificios con aislamiento sísmico se emplea $R = 1$ en la superestructura, dado que el sistema de aislamiento reduce drásticamente las fuerzas sísmicas transmitidas y no se espera comportamiento inelástico significativo en los elementos estructurales superiores.

2.2.2.7. Regularidad estructural

Según la Norma Técnica E.030 (2019), la regularidad estructural clasifica las edificaciones en regulares e irregulares según su configuración geométrica, distribución de masas y rigideces tanto en planta como en elevación. Esta clasificación influye directamente sobre el coeficiente de reducción sísmica R y sobre el tipo de análisis admisible, dado que las estructuras regulares pueden acogerse a procedimientos simplificados, mientras que las irregulares están sujetas a requisitos de análisis más exigentes y a penalizaciones en los factores de reducción de fuerzas sísmicas.

2.2.2.7.1. Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas “R”

Según la Norma Técnica E.030 (2019), el coeficiente de reducción sísmica R representa la capacidad de una estructura para resistir y disipar energía sísmica mediante

comportamiento inelástico controlado, permitiendo reducir las fuerzas de diseño respecto a las demandas elásticas. Este coeficiente se determina mediante la expresión $R = R_0 \cdot I_a \cdot I_p$, donde R_0 es el coeficiente básico de reducción asociado al sistema estructural, I_a el factor de irregularidad en altura e I_p el factor de irregularidad en planta, de acuerdo con el artículo 22 y las Tablas 8 y 9 de la norma. En el presente estudio, la edificación no presenta irregularidades en planta ni en elevación, por lo que ambos factores adoptan el valor de 1.0, resultando $R = R_0$.

2.2.2.8. Restricciones a la irregularidad

Según la Norma Técnica E.030 (2019), las restricciones a la irregularidad estructural se establecen en función de la categoría de la edificación y la ubicación de la zona sísmica, con la finalidad de garantizar un comportamiento sísmico seguro y predecible. De acuerdo con el artículo 20 y la Tabla 10 de dicha norma, las edificaciones de categorías A1 y A2 ubicadas en las zonas sísmicas 2, 3 y 4 no deben presentar irregularidades de ningún tipo, dado que su función esencial exige la máxima confiabilidad estructural ante sismos severos. Complementariamente, la Norma Técnica E.031 (2019), en su artículo 15 y Tabla 1, establece que las edificaciones de categoría A con aislamiento sísmico emplazadas en zona sísmica 3 no admiten irregularidades extremas, asegurando así la integridad del sistema de aislamiento y la protección continua de los ocupantes durante y después de un evento sísmico.

2.2.2.9. Sismo máximo considerado (SMC):

Según la Norma Técnica E.030 (2019), el Sismo Máximo Considerado (SMC) se define como el movimiento sísmico con una probabilidad de excedencia del 2% en 50 años, equivalente a un período de retorno de 2 500 años, y se representa mediante un espectro de pseudo-aceleraciones empleado para verificar la prevención del colapso estructural. Complementariamente, la Norma Técnica E.031 (2019), en su artículo 4, establece que para edificaciones con aislamiento sísmico en la base, el SMC se obtiene amplificando en 1.5 veces el sismo de diseño definido por la Norma E.030, con la finalidad de evaluar el comportamiento sísmico de la estructura bajo condiciones extremas y garantizar que los dispositivos de aislamiento mantengan su integridad funcional ante el evento sísmico más intenso previsto para el sitio.

2.2.2.10. Parámetros sísmicos

2.2.2.10.1. Factor de zona “Z”

Según la Norma Técnica E.030 (2019), el factor de zona Z representa la aceleración máxima horizontal en suelo rígido con una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad. El territorio peruano se divide en cuatro zonas sísmicas definidas a partir de la distribución espacial de la sismicidad histórica, las distancias epicentrales y la información neotectónica disponible. De acuerdo con el artículo 10 y la Tabla 1 de dicha norma, cada zona tiene asignado un valor de Z que refleja la aceleración efectiva máxima esperada en roca firme, correspondiendo a la zona sísmica 3 un valor de $Z = 0.35g$, valor adoptado en el presente estudio por corresponder a la ubicación geográfica de la edificación analizada.

2.2.2.10.2. Parámetro de sitio (S , T_P y T_L)

Según la Norma Técnica E.030 (2019), los parámetros de sitio S , T_P y T_L caracterizan las condiciones locales del suelo de cimentación y su influencia sobre la amplificación de las ondas sísmicas y la respuesta dinámica de la estructura. El factor de amplificación del suelo S cuantifica la capacidad del perfil de suelo para amplificar la aceleración sísmica de referencia y depende del tipo de suelo y de la ubicación de la zona sísmica; de acuerdo con el artículo 13 y la Tabla 3 de dicha norma, para una edificación ubicada en zona sísmica 3 con perfil de suelo tipo S_2 , se adopta un valor de $S = 1.15$. Por su parte, los períodos característicos T_P y T_L delimitan los rangos del espectro de respuesta de diseño: T_P define el límite superior de la plataforma de máxima amplificación espectral, mientras que T_L marca el inicio de la región de desplazamiento constante del espectro, siendo relevante para estructuras de período largo o flexible; conforme a la Tabla 4 de la norma, para suelo tipo S_2 se adoptan los valores $T_P = 0.60$ s y $T_L = 2.00$ s, parámetros empleados en la construcción del espectro de pseudo-aceleraciones de diseño del presente estudio.

2.2.2.10.3. Categoría de las edificaciones y factor de uso “U”

De acuerdo con la Norma Técnica E.031 (2019), la clasificación de las estructuras se determina por su funcionalidad y relevancia estratégica, asignando un factor de uso “U” que escala la demanda sísmica para asegurar la resiliencia institucional. En edificaciones con aislamiento sísmico, se establece un factor $U = 1.00$, fundamentado en que el sistema de protección garantiza por sí mismo la continuidad operativa y la

integridad de la superestructura ante eventos severos. Para establecimientos de salud categoría A1 en la zona sísmica 3, la normativa vigente impone el uso obligatorio de aisladores en la base. No obstante, para efectos de esta investigación, se evalúan comparativamente los modelos de base fija y aislada bajo el mismo parámetro $U = 1.00$, verificando así la eficiencia del aislamiento para mantener el comportamiento elástico.

2.2.2.10.4. Factores de modificación

Según la Norma Técnica E.031 (2019), los factores de modificación de propiedades son coeficientes que ajustan los valores nominales de rigidez y amortiguamiento de los dispositivos de aislamiento sísmico para considerar los efectos del envejecimiento, la temperatura, la velocidad de carga, el número de ciclos y la variabilidad inherente al proceso de fabricación. Para dispositivos de protección sísmica de Clase I, la norma establece límites máximos y mínimos de estos factores con la finalidad de garantizar que las propiedades mecánicas de los aisladores se mantengan dentro de rangos aceptables a lo largo de toda la vida útil de la estructura y bajo distintas condiciones de carga y ambientales. El diseño debe verificarse tanto con los valores límite superiores como con los inferiores de las propiedades modificadas, asegurando así un comportamiento sísmico predecible, seguro y confiable del sistema de aislamiento ante cualquier escenario de sollicitación sísmica.

Tabla 2
Factores de modificación máximo

FACTORES DE MODIFICACIÓN MÁXIMA PARA LOS DISPOSITIVOS CLASE I			
Aislador de caucho con núcleo de plomo	Factor de Modificación	Kd	Qd
	Máximo	1.3	1.5
	Mínimo:	0.8	0.8

Nota. Adaptado del Numeral C 17.2.8.4 de los comentarios al Capítulo 17 del ASCE 7-16

2.2.3. Aisladores

2.2.3.1. Tipos de aisladores

2.2.3.1.1. Aisladores Elastoméricos (Caucho natural)

Según San Martín (2022), los aisladores elastoméricos están conformados por capas alternas de caucho natural o sintético y placas de acero intercaladas, las cuales cumplen una función estructural doble: por un lado, las láminas de acero restringen el abultamiento lateral excesivo del elastómero bajo cargas de compresión, permitiendo que el dispositivo soporte grandes cargas verticales con deformaciones mínimas; por otro lado, la flexibilidad inherente del caucho proporciona la baja rigidez horizontal necesaria para desacoplar la superestructura del movimiento sísmico del suelo. El resultado es un dispositivo con una marcada anisotropía mecánica: elevada rigidez en dirección vertical para garantizar la estabilidad gravitacional de la estructura y alta flexibilidad lateral para permitir los desplazamientos de diseño requeridos por el sistema de aislamiento sísmico.

2.2.3.1.2. Aisladores de Goma de Alta Amortiguación (HDR)

Según Kelly y Naeim (2020), están conformados por una mezcla especial de caucho con aditivos, los cuales modifican significativamente las propiedades viscoelásticas del elastómero en comparación con el caucho natural convencional. Esto dota al dispositivo de una marcada histéresis mecánica, lo que se traduce en una capacidad de amortiguamiento efectivo que oscila entre el 8% y el 15%, valores notablemente superiores a los que ofrece un aislador elastomérico de caucho natural estándar. Como consecuencia, los aisladores HDR mejoran sustancialmente la disipación de energía sísmica, reduciendo los desplazamientos de la interfaz de aislamiento y las aceleraciones transmitidas a la superestructura sin necesidad de incorporar elementos metálicos adicionales en el núcleo del dispositivo.

2.2.3.1.3. Aisladores de Caucho con Núcleo de Plomo (LRB)

Según San Martín (2022), los aisladores de caucho con núcleo de plomo (LRB) combinan un cojinete elastomérico multilaminado con un núcleo de plomo instalado en el centro del dispositivo, cuyas propiedades mecánicas particulares le confieren un comportamiento dual ante distintos niveles de solicitación. Bajo cargas de servicio, como las producidas por la acción del viento, el núcleo de plomo permanece en rango elástico y aporta la rigidez lateral necesaria para limitar los desplazamientos del sistema; mientras que, ante las solicitaciones sísmicas de diseño, el plomo fluye plásticamente disipando

una importante cantidad de energía a través de un proceso cíclico de cedencia y recristalización, que le permite recuperar sus propiedades mecánicas tras cada evento. Este mecanismo histerético proporciona al sistema niveles de amortiguamiento efectivo que oscilan entre el 15% y el 35% del amortiguamiento crítico, convirtiendo a los aisladores LRB en uno de los dispositivos de mayor eficiencia en la protección sísmica de edificaciones esenciales.

Tabla 3

Cuadro comparativo de los tipos de aisladores elastoméricos

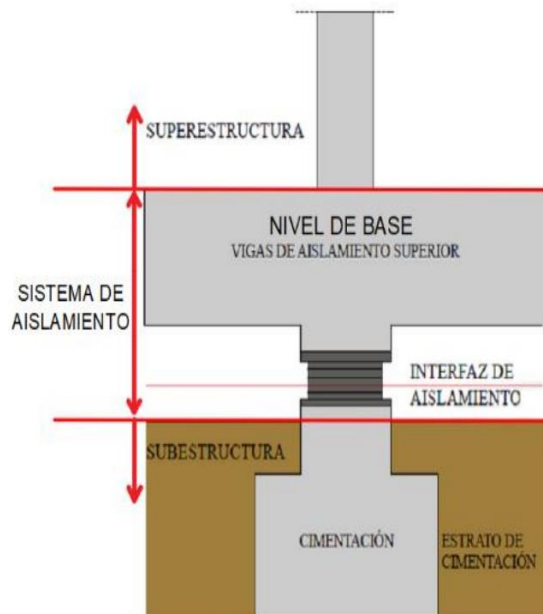
Característica	NRB	HDR	LRB
Material principal	Caucho natural o sintético	Caucho modificado químicamente	Caucho con núcleo de plomo
Amortiguación	Baja (2%-5%)	Media (8%-20%)	Alta (10%-35%)
Disipación de energía	Limitada	Histéresis del material	Histéresis del plomo y material.
Rigidez inicial	Baja	Moderada	Alta
Flexibilidad	Alta	Moderada	Menor que HDR

2.2.3.2. Partes de un sistema de aislamiento

Según la Norma Técnica E.031 (2019), un sistema de aislamiento sísmico está conformado por tres componentes principales: la superestructura, ubicada por encima del nivel de aislación; la subestructura, situada por debajo de la interfaz de aislamiento y vinculada directamente al suelo de cimentación; y el nivel de base, compuesto por los elementos horizontales que transfieren las fuerzas entre los dispositivos de aislamiento y la estructura. La interfaz de aislamiento constituye el plano horizontal donde se ubican los dispositivos y donde se concentra la mayor parte del desplazamiento lateral durante un evento sísmico, complementándose con un diafragma rígido superior que garantiza la distribución uniforme de los desplazamientos entre los aisladores, elementos de tope sísmico que limitan desplazamientos excesivos y juntas de dilatación sísmica que permiten el libre movimiento de la superestructura respecto a los elementos fijos del entorno.

Figura 1

Corte transversal de un sistema de aislamiento



2.2.3.3. Modelo numérico de aisladores elastoméricos

2.2.3.3.1. Modelo lineal

Según la San Martín (2022), el modelo lineal idealiza el comportamiento de los aisladores elastoméricos mediante una rigidez constante y un amortiguamiento viscoso equivalente, siendo aplicable principalmente en etapas de diseño preliminar. Este modelo asume deformaciones pequeñas y bajo amortiguamiento, caracterizándose por una relación fuerza-desplazamiento de naturaleza lineal, lo que simplifica el análisis, pero limita su precisión ante solicitaciones sísmicas de mayor intensidad.

2.2.3.3.1.1. Fuerza máxima (lineales)

Es una estimación de la demanda lateral considerando el comportamiento no lineal secante, el cual es equivalente a F_{max}

$$F_{MÁX} = K_{eff}D \quad \text{..... (18)}$$

2.2.3.3.1.2. Rigidez efectiva (k_{eff})

Según San Martín (2022), la rigidez efectiva k_{eff} se define como el cociente entre la fuerza máxima desarrollada por el aislador y el desplazamiento correspondiente, obtenido a partir de ciclos de carga experimental. Este parámetro representa la pendiente secante de la curva fuerza-desplazamiento evaluada al desplazamiento de diseño,

capturando de manera global el comportamiento no lineal del aislador mediante una expresión lineal equivalente, tal como se expresa en la siguiente ecuación

$$K_{eff} = \frac{F_M}{D_M} \quad \text{..... (19)}$$

2.2.3.3.1.3. Área del ciclo (amortiguamiento) (lineales)

Según San Martín (2022), el área del ciclo histérico representa la energía disipada por el aislador en cada ciclo completo de carga y es empleada para determinar el amortiguamiento equivalente lineal del sistema de aislamiento. Este parámetro establece la relación entre el amortiguamiento efectivo ξ y las propiedades físicas del dispositivo, obteniéndose a partir del trabajo realizado por las fuerzas de amortiguamiento a lo largo del ciclo histérico fuerza-desplazamiento, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

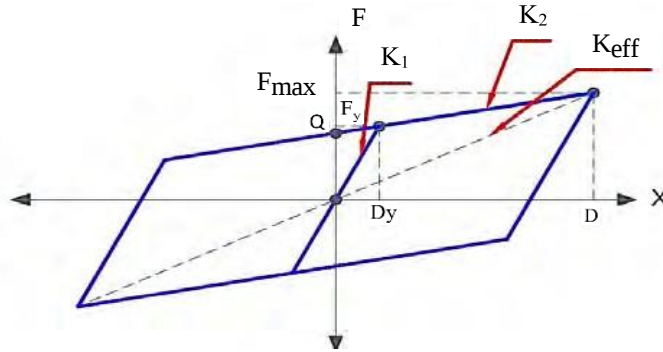
$$A = 2\pi * \xi * K_{eff} * D^2 \quad \text{..... (20)}$$

2.2.3.3.2. Modelo no lineal (K1, K2 Q2 Delta Y)

Según San Martín (2022), el modelo no lineal bilineal representa el comportamiento real de los aisladores elastoméricos mediante dos rigideces diferenciadas: una rigidez elástica inicial K1, que caracteriza la respuesta del dispositivo antes de alcanzar la fluencia, y una rigidez postfluencia K2, de menor magnitud, que gobierna el comportamiento del aislador ante deformaciones sísmicas significativas, complementándose con la fuerza característica Qd que define el nivel de fluencia del sistema. Este modelo permite representar de manera más fiel la deformación plástica y la disipación de energía por histéresis del dispositivo, describiendo la relación fuerza-desplazamiento a través de un lazo histérico cuya área encerrada representa la energía disipada en cada ciclo completo de carga y descarga, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

Figura 2

Modelo bilineal de los aisladores elastoméricos



2.2.3.3.2.1. Fuerza característica (Tonf)

Según San Martín (2022), la fuerza característica Qd representa la fuerza constante de disipación histerética aportada por la deformación plástica del núcleo de plomo del aislador. Esta fuerza corresponde al umbral necesario para activar la fluencia del dispositivo, controlando directamente la cantidad de energía disipada por histéresis y resultando fundamental para el cálculo del amortiguamiento efectivo del sistema, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$Q = D_y * K_2 * (\alpha - 1) \quad \text{..... (21)}$$

Asimismo, Qd puede calcularse a partir del área del lazo histerético y el desplazamiento de diseño, lo que permite verificar la consistencia del valor adoptado con los resultados experimentales de ensayos de caracterización. Esta formulación relaciona explícitamente la energía disipada con la fuerza característica, sirviendo como herramienta de validación del modelo bilineal, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{2\pi * \xi * K_{eff} * D^2}{4(D - D_y)} \quad \text{..... (22)}$$

2.2.3.3.2.2. Fuerza máxima

Según San Martín (2022), la fuerza máxima Fmax representa la capacidad lateral del aislador para el desplazamiento de diseño, siendo aplicable únicamente para desplazamientos superiores al límite de fluencia del dispositivo. Esta expresión corresponde a la rama postfluencia del modelo bilineal, donde la fuerza total resulta de la suma de la fuerza característica Qd y la contribución de la rigidez postfluencia K2 sobre el desplazamiento adicional respecto al punto de fluencia, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$F_{\max} = Q_d + K_2(D - D_y) \quad \text{..... (23)}$$

2.2.3.3.2.3. Coeficiente alfa

Según San Martín (2022), el coeficiente alfa α se define como la razón entre la rigidez postfluencia K_2 y la rigidez elástica inicial K_1 , controlando la transición de rigidez entre el comportamiento elástico y la fase postfluencia del aislador bilineal. Este parámetro cuantifica el grado de no linealidad del dispositivo y determina la capacidad del sistema para recentrarse tras un evento sísmico, siendo un indicador directo del equilibrio entre la disipación de energía y la fuerza de restitución lateral del aislador, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{K_2}{K_1} \quad \text{..... (24)}$$

2.2.3.3.2.4. Rigidez post fluencia K_2

Según San Martín (2022), la rigidez postfluencia K_2 se determina a partir de las propiedades geométricas y mecánicas del caucho una vez que el núcleo de plomo ha alcanzado su fluencia, representando la pendiente de la rama plástica del modelo bilineal. Este parámetro controla la estabilidad lateral del aislador en el rango de grandes deformaciones y su capacidad de centrarse después de un evento sísmico, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$K_2 = \frac{k_{eff} D}{(\alpha - 1) D_y + D} \quad \text{..... (25)}$$

2.2.3.3.2.5. Fuerza Elástica (Lineal O Pre Fluencia) (F_y)

Según San Martín (2022), la fuerza de fluencia marca el inicio del comportamiento no lineal del aislador, representando el límite superior del rango elástico a partir del cual el núcleo de plomo comienza a plastificarse. Antes de alcanzar este punto, la relación fuerza-desplazamiento es de naturaleza lineal y queda gobernada por la rigidez elástica inicial K_1 , tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$F_y = K_1 D_y \quad \text{..... (26)}$$

Una vez superado el punto de fluencia, la fuerza F_y puede expresarse también en función de la fuerza característica Q_d y la rigidez postfluencia K_2 , estableciendo la condición de compatibilidad entre ambas ramas del modelo bilineal y garantizando la consistencia de los parámetros de diseño del aislador, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$F_y = Q + K_2 D_y \quad \text{..... (27)}$$

2.2.3.3.2.6. Rigidez inicial o elástica K1

Según San Martin (2022), la rigidez elástica inicial K1 se obtiene a partir de la pendiente inicial del diagrama experimental fuerza-desplazamiento del aislador, caracterizando el comportamiento del dispositivo en la fase elástica previa a la fluencia del núcleo de plomo. Este parámetro se expresa en función del coeficiente alfa α y la rigidez postfluencia K2, siendo su valor siempre superior al de K2 dado que α es menor que la unidad, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$K_1 = \alpha K_2 \quad \text{..... (28)}$$

2.2.3.3.2.7. Rigidez efectiva (no lineales)

Según San Martin (2022), la rigidez efectiva Keff para el modelo bilineal se define como la rigidez secante evaluada al desplazamiento de diseño, combinando la contribución de la rigidez postfluencia K2 y la fuerza característica Qd

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad \text{..... (29)}$$

2.2.3.3.2.8. Desplazamiento de fluencia Δy

Según San Martin (2022), el desplazamiento de fluencia ΔY determina el límite entre el comportamiento elástico y el comportamiento histerético del aislador, marcando el punto a partir del cual el dispositivo transita de una respuesta lineal hacia una respuesta plástica con disipación de energía. Este parámetro define el inicio del ciclo histerético efectivo y se obtiene como el cociente entre la fuerza de fluencia F_y y la diferencia entre la rigidez elástica inicial K1 y la rigidez postfluencia K2, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$\Delta_y = \frac{F_y}{K_1 - K_2} \quad \text{..... (30)}$$

2.2.3.3.2.9. Área encerrada del ciclo histerético (no lineales)

Según San Martin (2022), el área encerrada del ciclo histerético cuantifica la energía disipada por deformación plástica del aislador en cada ciclo completo de carga, siendo proporcional a la fuerza característica Qd y al desplazamiento plástico neto. Este parámetro constituye una medida directa de la capacidad de disipación de energía del dispositivo y es fundamental para el cálculo del amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$A_B = 4Q(D - D_y) \quad \text{..... (31)}$$

2.2.3.3.3. Equilibrio de fuerzas

2.2.3.3.3.1. Equilibrio de fuerzas, rigidez inicial-post fluencia

sirve para verificar la compatibilidad del modelo; debe satisfacerse siempre que el modelo bilineal sea válido, para lo cual busca garantizar que la rigidez efectiva secante sea consistente con el modelo bilineal y busca relacionar los tres parámetros de rigidez con los desplazamientos característicos.

$$K_{eff}D = K_1D_y + K_2(D - D_y) \quad \text{..... (32)}$$

2.2.3.3.3.2. Igualdad de áreas

el área calculada por amortiguamiento viscoso equivalente y el área del lazo histerético bilineal establece la relación fundamental entre amortiguamiento efectivo ξ y resistencia característica Q , permitiendo calcular uno conociendo el otro; esta ecuación es esencial para el diseño iterativo del aislador.

$$2\pi * \xi * K_{eff} * D^2 = 4Q(D - D_y) \quad \text{..... (33)}$$

2.2.3.3.3.3. Desplazamiento de fluencia Δ_y

Representa el balance energético completo del sistema bilineal considerando la relación de rigideces α , el cual sirve para calcular iterativamente el desplazamiento cuando se especifica el amortiguamiento objetivo. Para el cálculo del desplazamiento de fluencia D_y requerimos el desplazamiento máximo (D_m), asumido por el desplazamiento traslacional, el amortiguamiento y α , el D y reemplazo en la siguiente ecuación

$$2\pi * \xi * D - 4 * \frac{D_y(\alpha - 1)}{D + (\alpha - 1)D_y} * (D - D_y) = 0 \quad \text{..... (34)}$$

2.2.3.3.4. Estimación del peso

Según la Norma Técnica E.030 (2019), el peso sísmico P de una edificación se determina sumando la carga permanente más una fracción de la carga viva, cuyo porcentaje depende de la categoría de la edificación y del tipo de uso de los ambientes. De acuerdo con el artículo 26 de dicha norma, para edificaciones de categoría A y B se considera el 50% de la carga viva en la estimación del peso sísmico, parámetro fundamental para la determinación de las fuerzas sísmicas de diseño y para el

dimensionamiento de los dispositivos de aislamiento en función de la carga gravitacional tributaria que actúa sobre cada uno de ellos.

2.2.3.3.5. Desplazamientos laterales relativos permisibles

Según la Norma Técnica E.030 (2019), los desplazamientos laterales relativos permisibles se establecen en función del material estructural predominante, con la finalidad de controlar el daño en elementos estructurales y no estructurales y garantizar un adecuado comportamiento sísmico de la edificación. De acuerdo con el artículo 32 y la Tabla 11 de dicha norma, para edificaciones de concreto armado se fija un límite máximo de distorsión de entrepiso igual a 0.007, valor que debe verificarse en cada nivel de la estructura considerando los desplazamientos obtenidos del análisis sísmico amplificados por el coeficiente de reducción R correspondiente al sistema estructural adoptado.

2.2.3.3.6. Aceleración espectral

Según la Norma Técnica E.030 (2019), la aceleración espectral representa la respuesta máxima de aceleración de un oscilador de un grado de libertad (1 GDL) ante una excitación sísmica determinada, dependiendo de la frecuencia de vibración de la estructura y del espectro de respuesta sísmico del sitio. Este parámetro sirve para evaluar la demanda sísmica sobre las estructuras de base fija y se calcula mediante la pseudo aceleración espectral, la cual incorpora los parámetros de zona Z, factor de uso U, amplificación sísmica C, factor de suelo S y coeficiente de reducción R, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$S_a = \frac{Z * U * C * S}{R} * g \quad \text{..... (35)}$$

2.2.3.3.7. Pseudo Aceleración

Según la Norma Técnica E.031 (2019), en su artículo 14, la pseudo aceleración para un edificio con base aislada representa la máxima aceleración absorbida por el sistema de aislamiento, la cual se obtiene amplificando en 1.5 veces los parámetros sísmicos correspondientes al Sismo Máximo Considerado. A diferencia de una estructura de base fija, el sistema de aislamiento concentra la demanda sísmica en el nivel de la interfaz, reduciendo significativamente las aceleraciones transmitidas a la superestructura, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$S_{aM} = 1.5ZUCSg \quad \text{..... (36)}$$

2.2.3.3.8. Desplazamientos

2.2.3.3.8.1. Desplazamiento traslacional (Sd)

Según la Norma Técnica E.031 (2019), en su artículo 20, menciona que el desplazamiento traslacional Sd representa el desplazamiento horizontal máximo en el centro de rigidez del sistema de aislamiento sísmico, calculado sin considerar los efectos de torsión y constituyendo el punto de partida del proceso iterativo de diseño. Este parámetro depende de la pseudo aceleración espectral SaM, el período efectivo de aislamiento Tb y el factor de amortiguamiento BM, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$S_d = \frac{S_{aM} T_b^2}{4\pi^2 B_M} \quad \text{..... (37)}$$

2.2.3.3.8.2. Desplazamiento inicial

Para iniciar el proceso iterativo de diseño del sistema de aislamiento, el desplazamiento inicial se asume igual al desplazamiento traslacional Sd, de modo que la razón entre ambos valores sea igual a la unidad. Esta condición de partida simplifica el arranque del procedimiento iterativo y permite obtener de manera progresiva los parámetros definitivos del sistema de aislamiento, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$D_M = S_d \quad \text{..... (38)}$$

2.2.3.3.8.3. Desplazamiento en el centro de rigidez (D'm):

Según la Norma Técnica E.031 (2019), el desplazamiento en el centro de rigidez D'M representa el desplazamiento traslacional puro en el centro geométrico de rigidez del sistema de aislamiento, obtenido mediante un proceso iterativo que considera tanto la componente traslacional como la rotacional del movimiento. Este parámetro modifica el desplazamiento de diseño DM incorporando la influencia de la razón entre el período rotacional Tf y el período traslacional Tm del sistema, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T_f}{T_m}\right)^2}} \quad \text{..... (39)}$$

2.3. Definición de términos básicos

- Aislador: elemento estructural verticalmente rígido y horizontalmente flexible que desacopla la superestructura del movimiento sísmico del suelo (Norma Técnica E.031, 2019).
- Amortiguamiento efectivo: energía disipada durante la respuesta cíclica del sistema de aislamiento sísmico, expresada como fracción del amortiguamiento crítico (Norma Técnica E.031, 2019).
- Comportamiento estructural: es la respuesta dinámica de la edificación ante sismos para garantizar estabilidad y operatividad (Norma Técnica E.031, 2019).
- DBE (Design Basis Earthquake): sismo de diseño con probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, equivalente a un período de retorno de 475 años (Norma Técnica E.031, 2019).
- DTD desplazamiento total de diseño que experimenta el sistema de aislamiento sísmico ante el Sismo Base de Diseño (Norma Técnica E.031, 2019)
- DTM desplazamiento máximo total que experimenta el sistema de aislamiento sísmico ante el Sismo Máximo Considerado, incluyendo efectos rotacionales (Norma Técnica E.031, 2019).
- Fuerza de restitución lateral: fuerza horizontal generada por deformación lateral de los aisladores que debe superar el 0.025 del peso de la edificación (Norma Técnica E.031, 2019).
- Interfaz de aislamiento: zona limitada superiormente por la superestructura aislada e inferiormente por la subestructura, donde se ubican los dispositivos de aislamiento (Norma Técnica E.031, 2019).
- MCE o "Sismo Máximo Considerado" nivel máximo de movimiento sísmico con probabilidad de excedencia del 2% en 50 años, equivalente a un período de retorno de 2 475 años (Norma Técnica E.030, 2019).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación geográfica

La ubicación geográfica del proyecto de investigación corresponde al Hospital Simón Bolívar, ubicado en la Av. Mario Urteaga N° 500.

- País : Perú
- Departamento : Cajamarca
- Provincia : Cajamarca
- Distrito : Cajamarca
- Coordenadas UTM:
 - Este : 0774705
 - Norte : 9208220

Figura 3

Ubicación en la ciudad de Cajamarca en Perú



Nota. Google Maps (2026)

El proyecto de investigación se localiza en una zona sísmica de tipo 3, sobre un terreno que presenta un perfil de suelo tipo S2 con una velocidad de onda de corte inicial de 250 m/s.

Tabla 4*Resumen de las velocidades de onda de corte (V_s)*

POTENCIA ESTRATO	TIPO DE SUELO	CLASIFICACIÓN
0.00 m – 6.80 m	Suelos intermedios: suelos medianamente rígidos con velocidades de propagación de onda de corte entre 250m/s y 700 m/s	S2
6.80m – 20.00 m	Suelos rígidos: suelos rígidos con velocidades de propagación de onda de corte entre 700m/s y 1350 m/ s	S1
Más de 20 m	Suelos rígidos: suelos rígidos con velocidades de propagación de onda de corte a mayor de 1350m/s	S1

Nota. Adaptado de *Estudio de Mecánica de Suelos: Mejoramiento y ampliación de los servicios de salud del establecimiento de salud Simón Bolívar* (p. 52), por E. R. Dextre Morimoto, 2022.

3.2. Tiempo y época de investigación

La presente investigación se desarrolló entre los años 2024 y 2025. Esta temporalidad permite garantizar la vigencia normativa de las normas E.030 y E.031 (2019)

3.3. Metodología

3.3.1. Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada, debido a que utiliza los principios estructurales y las disposiciones de la Norma E.031, para validar la eficacia del aislamiento sísmico para garantizar la operatividad continua después de un evento sísmico, en el contexto geotécnico de Cajamarca.

3.3.2. Nivel y diseño de investigación

El nivel es descriptivo, puesto que se cuantifican y contrastan las respuestas de los sistemas (cortante, derivas de entrepiso, aceleraciones) de dos configuraciones estructurales bajo las mismas demandas sísmicas. El diseño es no experimental y transversal, ya que la recolección de datos se realiza mediante simulaciones numéricas en un único periodo de tiempo, analizando el comportamiento del hospital, observando su respuesta ante registros sísmicos reales.

3.3.3. Enfoque:

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, siendo cuantitativo porque cuantifica los datos numéricos obtenidos mediante el modelamiento de las estructuras, permitiendo así medir con precisión variables como la cortante, derivas de entrepiso y aceleraciones; porque, a partir de diferentes simulaciones, se propone y valida una solución con aislamientos elastoméricos, con el fin de que esta tesis proyecte su alcance hacia la garantía de operatividad continua de hospitales, bajo la norma E.031.

3.3.4. Método de investigación

Es hipotético - deductivo y cuantitativo porque forma parte de una premisa verificable, para deducir el comportamiento estructural mediante el análisis numérico de variables objetivas, el cual se basa en la medición de cortantes y derivas de entrepiso y aceleraciones obtenidas de simulaciones, permitiendo validar la hipótesis mediante datos exactos.

3.3.5. Población de estudio

Comprende los establecimientos de salud con Categoría A1, situados en la Zona Sísmica 3, en la ciudad de Cajamarca.

3.3.6. Muestra

Es no probabilística, hospital prototipo de cuatro niveles proyectado sobre un suelo tipo S2, zona 3 en la ciudad de Cajamarca.

3.3.7. Variables:

Variables Independientes:

- Sistema de base estructural: Es el tipo de vinculación entre la cimentación y la superestructura, categorizado en dos niveles: la base fija, sistema convencional rígidamente conectado al suelo, el cual transmite directamente las aceleraciones sísmicas hacia la superestructura; y la base aislada, sistema de protección sísmica que incorpora dispositivos de aislamiento en la interfaz suelo-estructura.

Variable Dependiente:

- Comportamiento sísmico de los hospitales con y sin sistema de aislamiento sísmico en la base, medidos con los siguientes indicadores: desplazamientos laterales, derivas de entrepiso, fuerza cortante de entrepiso y aceleración máxima de piso

3.3.8. Unidad de análisis

La unidad de análisis es el comportamiento estructural del hospital prototipo de cuatro niveles, con un área total de 16065 m².

3.3.9. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplearon técnicas sistemáticas que permiten la obtención y el procesamiento de datos cuantitativos para validar la hipótesis:

- **Análisis documental:** se realizó análisis de la recopilación y sistematización de la información de fuentes documentales para poder obtener los registros sísmicos, el estudio de Mecánica de Suelos del Hospital Simón Bolívar, así como las Normas técnicas E.030 y E.031 (2019) del Reglamento Nacional de Edificaciones.
- **Observación estructurada:** se observó la variación de las respuestas de la estructura durante los eventos sísmicos, permitiendo capturar de manera objetiva el comportamiento de las variables (derivadas de entrepiso, cortantes y aceleraciones).
- **Modelamiento y simulación numérica:** consiste en la creación de prototipos virtuales para someterlos a demandas sísmicas reales, permitiendo observar la interacción entre la superestructura y los dispositivos de aislamiento basal.
- **Análisis comparativo:** se realizó la comparación y evaluar los resultados obtenidos en el sistema de base fija frente al sistema aislado, determinando la eficiencia del aislamiento.

3.4. Procedimiento

3.4.1. Arquitectura

La arquitectura se modeló en Revit, la cual consiste en un hospital con cuatro niveles, con una altura de entrepiso de 4 m, con un área rectangular en planta de 67,50 m x 59,50 m, y con un área total de 16,065 m²

Figura 4

Modelamiento arquitectónico

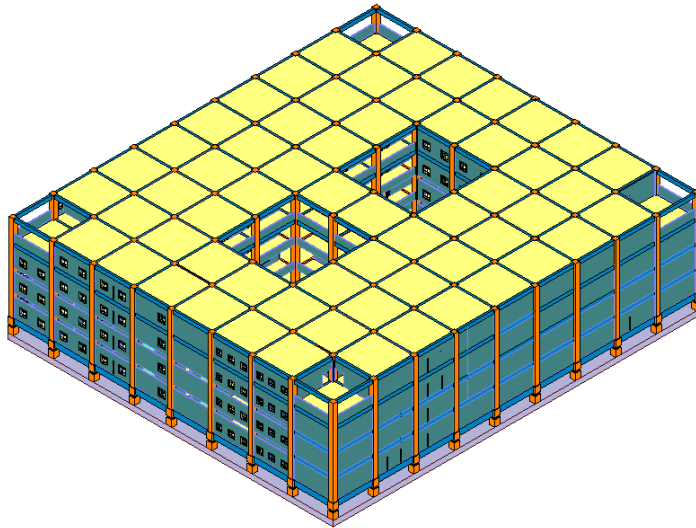
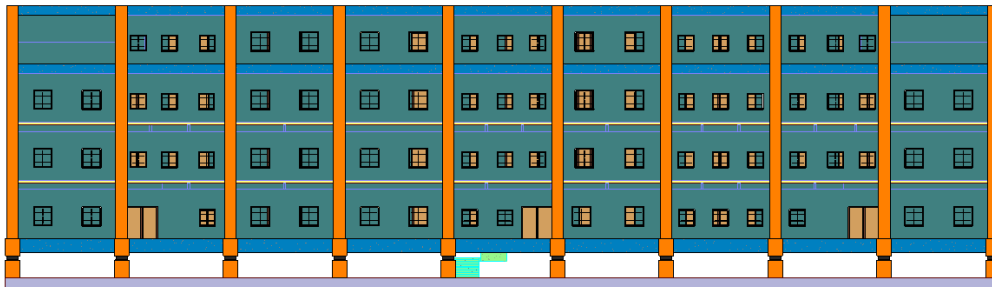


Figura 5

Modelamiento arquitectónico



3.4.2. Predimensionamiento de elementos estructurales

3.4.2.1. Predimensionamiento de Losas Macizas en dos Direcciones.

Las losas macizas bidireccionales ofrecen mayor resistencia y rigidez ante grandes luces, permitiendo optimizar su espesor. Para su predimensionamiento se empleó el criterio de Blanco Blasco (1994), que establece dividir el perímetro total de la losa entre 180. Considerando un perímetro de 30 m, se obtiene el espesor de diseño correspondiente.

$$e = \text{Perímetro}/180 \quad \dots\dots (40)$$

$$e = \frac{30}{180} = 0.167m$$

$$\therefore e = 0.20 m$$

Por lo tanto, considero un espesor de losa maciza de 0.20 m.

3.4.2.2. Predimensionamiento de vigas

Para el predimensionamiento de vigas en sistemas de pórticos, el peralte (h) se estima en función de la luz libre, y el ancho mínimo para vigas con responsabilidad sísmica no debe ser inferior a 0.25 m ni a la mitad del peralte (NTE E.060). Adoptando el criterio de Blanco Blasco (1994) para vigas continuas con $h = L/12$, considerando la naturaleza hospitalaria de la estructura y sus cargas considerables, se garantiza rigidez adecuada y control de deflexiones sin incurrir en sobrepeso muerto innecesario.

Cálculo del peralte de la viga

$$h = \frac{L}{12} \quad \dots\dots (41)$$

Cálculo del ancho de la viga

$$b = h/2$$

Remplazando:

Cálculo del peralte de la viga

$$h = \frac{7.5}{12} = 0.625 \text{ cm}$$

$$\therefore h = 0.65 \text{ m}$$

Cálculo del ancho de la viga

$$b = 0.65/2$$

$$b = 0.325 \text{ m}$$

$$\therefore b = 0.35 \text{ m}$$

Por lo tanto, considero las vigas con dimensión de 0.35m x 0.65 m.

3.4.2.3. Predimensionamiento de Columnas

Para el predimensionamiento de columnas se adoptó la metodología de Oviedo Sarmiento (2016), la cual determina el área de la sección transversal considerando factores según la ubicación de la columna. Dado que se trata de una columna central, se emplean los coeficientes $\lambda = 1.1$ y para $\eta = 0.30$, como se indican en la Tabla 3.4 de dicho autor.

Cálculo del Pservicio:

$$P_{servicio} = P * A_{tributaria} * N_{pisos}$$

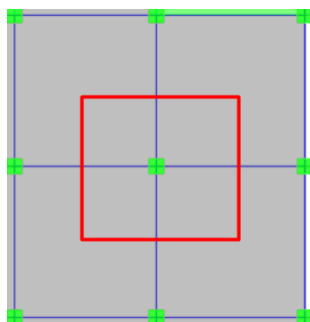
Cálculo del área de la sección de la columna:

$$A_c = \frac{\lambda * P_{servicio}}{\eta * f'_c} \quad \dots\dots (42)$$

Para el cálculo de la carga de servicio ($P_{servicio}$), depende de la categoría de la edificación (Categoría A, $P = 1500 \frac{kg}{m^2}$), el área tributaria y el número de pisos que soporta la columna. Considerando que las losas presentan dimensiones máximas entre 7.50 m y 8.00 m, el área tributaria correspondiente a una columna central asciende a 61.40 m², y la edificación contempla cuatro niveles.

Figura 6

Área tributaria



cálculo del $P_{servicio}$:

$$P_{servicio} = 1500kg/m^2 * 56.25m^2 * 4$$

$$P_{servicio} = 337,500Kg$$

Cálculo del área de la sección de la columna:

$$Ac = \frac{1.1 * 337,500}{(0.30 * 280)}$$

$$Ac = 4,419.64 \text{ cm}^2$$

$$\therefore b = 0.70 \text{ m y } d = 0.70 \text{ m}$$

Para las dimensiones de las columnas decidí emplear 0.70m x 0.70 m.

3.4.5.4. Predimensionamiento de vigas para el sistema de Aislamiento

Para el predimensionamiento de las vigas de aislamiento, se considera que estas forman parte de la interfaz del sistema, cumpliendo funciones esenciales como controlar los desplazamientos diferenciales entre columnas, proporcionar estabilidad ante efectos de volteo y restringir las rotaciones en los dispositivos de aislamiento, previniendo así la aparición de tracciones. Siguiendo el criterio adoptado por Meza Tintaya (2020), se propone una sección de 1.00 m x 0.50 m, la cual será verificada en el análisis estructural.

3.4.3. Metrado de cargas

3.4.3.1. Carga muerta:

3.4.3.1.1. Carga muerta del peso propio de las losas:

Para el metrado de cargas de la losa maciza, se consideró la asignación de cargas distribuidas correspondientes al peso propio y al piso terminado, las cuales fueron aplicadas directamente sobre la losa modelada como membrana en el modelo estructural

$$Pp = 0.20 * 2.4 = 0.48Tn/m^2$$

$$Pt = 0.10 \text{ Tn}/m^2$$

$$CM = 0.58Tn/m^2$$

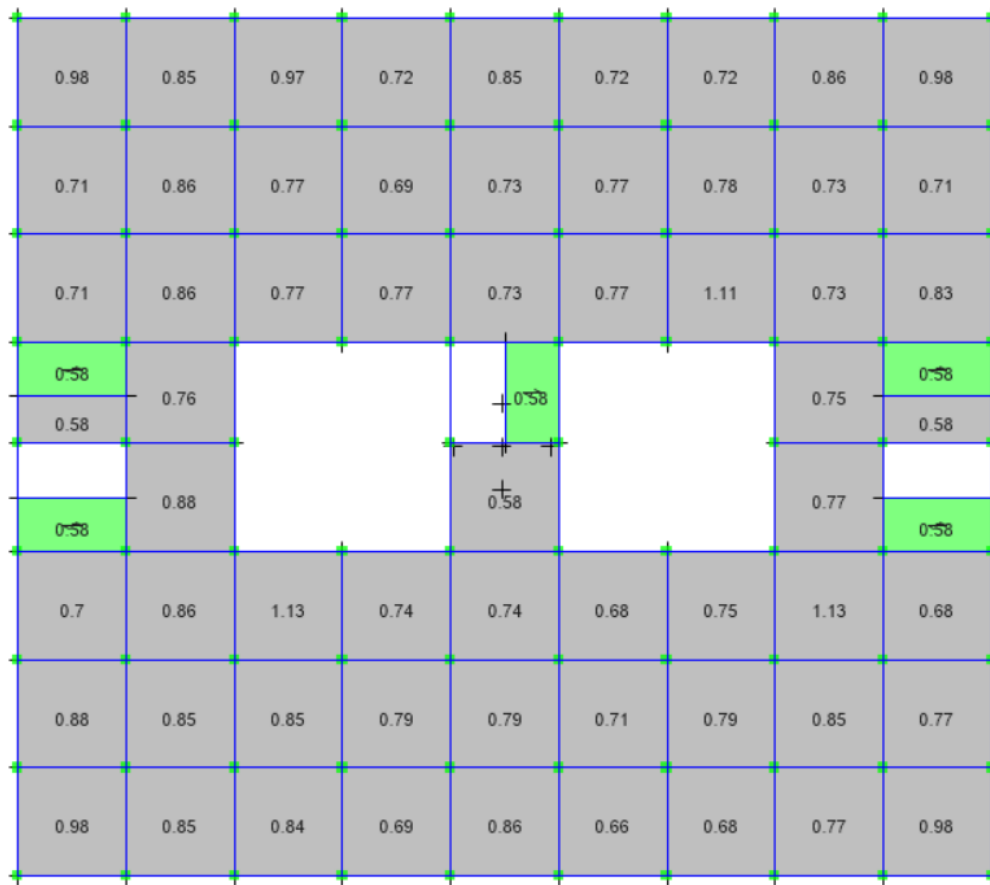
3.4.3.1.2. Carga muerta de los tabiques en la losa:

La determinación precisa de las cargas permanentes resulta fundamental para la correcta representación de la masa sísmica en el modelo estructural. Para ello, se realizó un metrado detallado de la tabiquería, considerando muros de albañilería de 0.15m de

espesor y un peso específico de 1.8 t/m^3 , con el fin de obtener una carga distribuida por unidad de área (t/m^2) que permita una asignación más realista sobre las losas de entrepiso. El procedimiento consistió en cuantificar el peso total de los tabiques en cada paño y distribuirlo entre el área tributaria de la losa correspondiente, excluyendo el peso propio de la losa y demás acabados, garantizando así un control riguroso de las cargas muertas adicionales.

Figura 7

Distribución del peso de la tabiquería fija y el peso propio de la losa



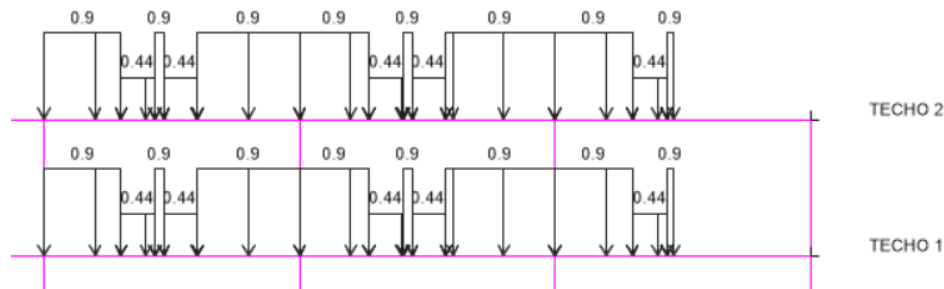
3.4.3.1.3. Carga muerta sobre las vigas:

Para la asignación de cargas sobre las vigas, se distinguieron dos tipos: la carga distribuida, obtenida a partir del peso de los tabiques continuos sobre la viga, y la carga puntual, proveniente de tabiques que descansan directamente sobre la losa y se interceptan a las vigas. A continuación se aprecia la distribución de ambas cargas en las vigas de los techos 1 y 2, correspondientes a los ejes 6, 7, 8 y 9 (de izquierda a derecha).

Carga distribuida: Peso de los tabiques sobre vigas = $1.8 * 0.15 * 3.35 = 0.90 \text{ tn/m}$

Figura 8

Distribucion de cargas muertas en las vigas



Carga puntual: Peso de los tabiques sobre vigas = $1.8 * 0.15 * 3.35 * .35 = 0.32tn$

3.4.3.1.4. Azotea:

Para la azotea se considera una carga viva de 0.100 tn/m^2 sobre las losas, dado que no se prevé tránsito en dicho nivel. No se incluye carga por piso terminado, debido a que la superficie quedará conformada únicamente por la losa de 20 cm de espesor, cuyo peso propio es de 0.48 tn/m^2 .

3.4.3.2. Cargas vivas

Las cargas vivas empleadas en el proyecto fueron asignadas conforme a la NTE E.020, adoptándose los siguientes valores según el tipo de ambiente:

- | | |
|---------------------------|-----------------------|
| • Cuartos | 200 kg/m ² |
| • Corredores y escaleras | 400 kg/m ² |
| • Ambientes para asamblea | 400 kg/m ² |
| • Almacenes | 500 kg/m ² |
| • Azotea sin equipos | 100 kg/m ² |

3.4.4. Modelamiento estructural

El modelado estructural se desarrolló en el software ETABS v22, configurando una grilla con separación predominante de 7.50 m en ambas direcciones, una altura de entrepiso de 4.00 m y un total de 4 niveles. La asignación de tipos de elemento en el modelo se detalla en la Tabla 5 y las propiedades del concreto armado adoptadas fueron las siguientes:

Propiedades del Concreto armado:

Peso específico de 2400kg/m ³	 (43)
Resistencia a la compresión, $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$	 (44)
Módulo de elasticidad, $E = 2\,509\,980.08 \text{ Tonf/m}^2$	 (45)
Módulo de poisson, $\nu = 0.15$	 (46)
Deformación unitaria de 0,003, siguiendo el modelo de esfuerzo-deformación propuesto por Whitney.	 (47)

Tabla 5

Elementos estructurales en Etabs v22

Elemento estructural	Tipo
Losas	Membrana / Slab
Vigas	Frame
Columnas	Frame
Escaleras	Membrana / Slab
Placas	Shell thin
Vigas de cimentación	Frame
Aisladores	Link

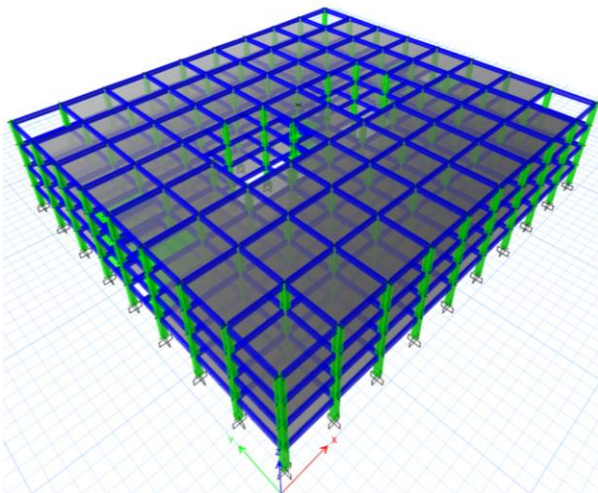
Se procedió a realizar el modelamiento para cada una de los sistemas, como se muestra a continuación:

3.4.4.1. Modelo de estructura en Base fija

El sistema de base fija fue modelado con losas macizas de 20 cm de espesor, vigas de 0.350 m de ancho y 0.650 m de peralte y columnas cuadradas de 0.70m × 0.70 m, considerando empotramiento en la base. El modelo resultante se presenta a continuación:

Figura 9

Modelo de estructura en base fija



3.4.4.2. Modelo de estructura en Base aislada

Para el punto de partida del modelo con base aislada, se desarrolló un modelo de base fija con sistema aporticado, compuesto por losas macizas de 0.20 m de espesor, vigas de 0.35 m de ancho y 0.65 m de peralte, columnas cuadradas de 0.70 m $\times$ 0.70 m, vigas de cimentación de 0.50 m de ancho y 1.00 m de peralte, y una platea de cimentación de 0.25 m de espesor, con apoyos simples Figura 10, sobre este modelo se realizó un análisis modal espectral con 12 modos de vibración, con el fin de determinar el período fundamental de vibración de la estructura sin dispositivos de aislamiento, el cual constituye la base para el cálculo del período objetivo del sistema aislado.

Posteriormente, se modeló el sistema de base aislada manteniendo la misma configuración aporticada y secciones estructurales, incorporando 88 aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) ubicados bajo cada una de las columnas Figura 11.

Figura 10

Modelo inicial

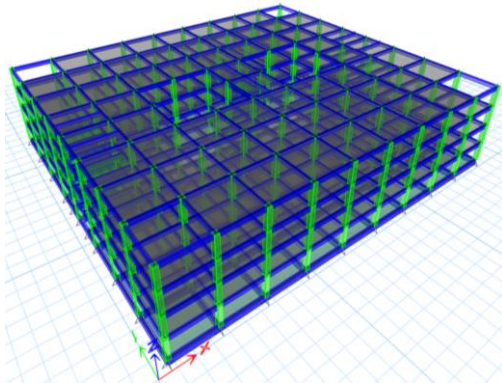
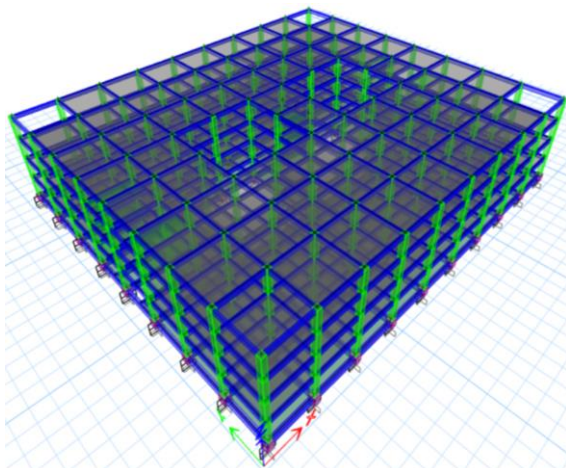


Figura 11

Modelo de estructura en base aislada



3.4.5. Análisis sísmico

3.4.5.1. Parámetros sísmicos

Los parámetros sísmicos empleados en el análisis fueron definidos conforme a la Norma Técnica E.031 (2019). Para efectos de esta comparación, se utilizó el espectro de pseudo-aceleraciones elástico, asumiendo que la estructura de base fija permanece en el rango lineal, es decir, sin presentar daño estructural. Los valores correspondientes se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6

Resumen de parámetros sísmicos

RESUMEN DE PARAMETROS SISMICOS		
Factor de Zona	$Z_3 \rightarrow Z = 0.35$	 (48)
Factor de Importancia	Edificación Esencial $U = 1.00$	 (49)
Perfil de Suelo	$S_2 \rightarrow S = 1.15$ $T_p = 0.60$ $TL = 2.00$	 (50) (51) (52)
Irregularidades	$I_p = 1$ $I_a = 1$	 (53)
Sistema estructural	Pórtico	
Coefficiente de Reducción de fuerza sísmica	$R_o = 1.00$	 (54)

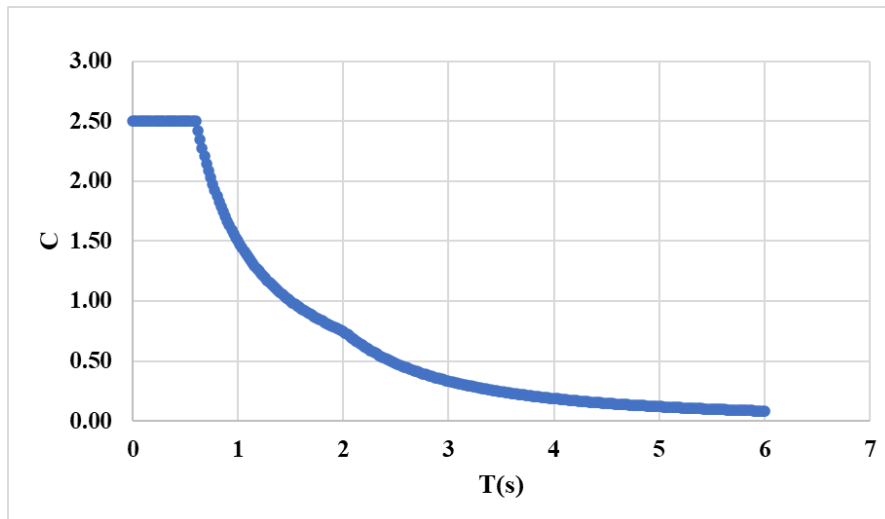
3.4.5.2. Espectro de pseudo aceleración

3.4.5.2.1. Análisis Espectral en base fija

Para el análisis modal espectral de la estructura de base fija, se empleó la curva de amplificación sísmica, calculando el espectro del coeficiente de amplificación sísmica C mediante las expresiones correspondientes (..... (11)..... (12)..... (13),). El espectro resultante se presenta en la Figura 12.

Figura 12

Espectro del coeficiente de amplificación sísmica (C).



Dado que la función introducida en Etabs v22 corresponde únicamente al coeficiente de amplificación sísmica C, resulta necesario transformarla en un espectro de pseudo-aceleraciones, para lo cual se determinó un factor de escala que incorpora el coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas $R = 1$ (para aspectos de comparación), el factor de importancia $U = 1.0$ (edificación esencial), los parámetros de sitio correspondientes a la zona ($Z=0.35$) y al perfil de suelo (S2), y la aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$), siendo U1 la dirección de aplicación principal. El espectro de pseudo-aceleraciones obtenido, considerando un período de retorno de 475 años correspondiente al sismo de diseño,

$$\text{Factor } U1 = \frac{ZxUxSxg}{R}$$

$$\text{Factor } U1 = \frac{0.35x1x1.15x9.81}{1} = 3.949\text{m/s}^2$$

$$\text{Factor } U2 = 3.949 * 30\% = 1.184\text{m/s}^2$$

Figura 13

$$\text{Factor } U1 = \frac{ZxUxSxg}{R}$$

Aclaración sobre el factor de reducción sísmica R utilizado en la comparación

Con fines exclusivamente investigativos, en el presente análisis comparativo se adopta un factor de reducción sísmica $R = 1$, en lugar del valor normativo $R = 8$.

Esta decisión obedece a la necesidad de mantener condiciones uniformes entre los sistemas evaluados: para que la comparación entre el sistema de base fija y el sistema con aislamiento sísmico sea válida y coherente, ambos deben analizarse bajo los mismos parámetros, incluyendo el mismo espectro de diseño y el mismo comportamiento elástico. En consecuencia, se emplean espectros elásticos tanto para el sistema de base fija como para el sistema aislado.

Dado que se busca representar la estructura trabajando en el rango elástico, el uso de $R = 1$ es el más apropiado para este propósito comparativo, ya que no introduce modificaciones por ductilidad ni disipación de energía que alterarían la equivalencia del análisis. Por tanto, no se aplica $R = 8$ en esta instancia, reservando dicho valor para el análisis convencional fuera del alcance de esta comparación.

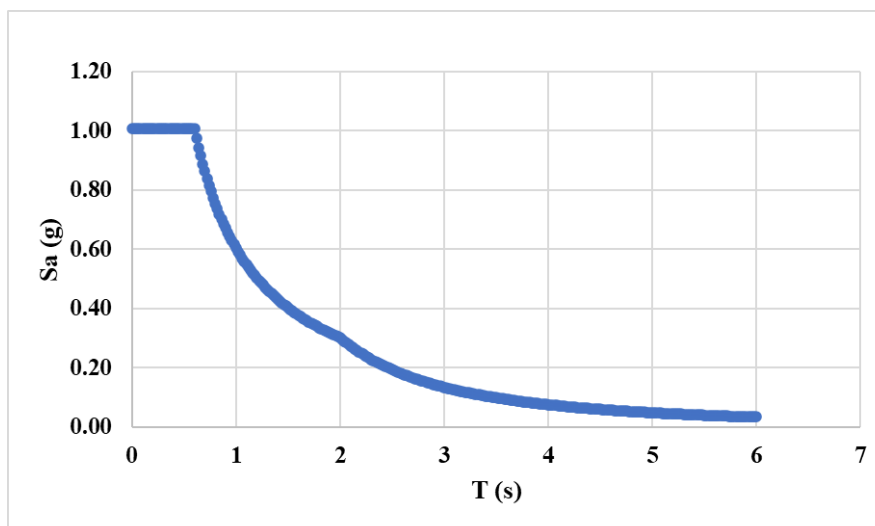
$$Factor\ U1 = \frac{Z_x U_x S_x g}{R}$$

$$Factor\ U1 = \frac{0.35 \times 1 \times 1.15 \times 9.81}{1} = 3.949 \text{ m/s}^2$$

$$Factor\ U2 = 3.949 \times 30\% = 1.184 \text{ m/s}^2$$

Figura 13

Espectro de pseudo aceleraciones

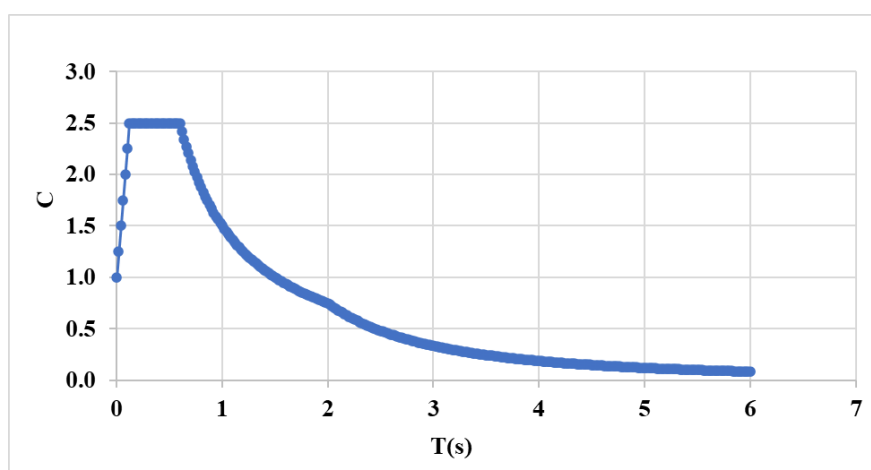


3.4.5.2.2. Análisis Modal espectral base aislada

Para la construcción de los espectros de respuesta del sistema de base aislada se aplicó la NTE E.031 (2019), adoptando un coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas $R = 1$, con el fin de garantizar el comportamiento elástico de la superestructura, y un factor de importancia $U = 1.0$ conforme a la categoría de edificación esencial para sistemas aislados. El coeficiente de amplificación sísmica C fue calculado mediante las expresiones indicadas en las ecuaciones (..... (14)..... (15)..... (16)..... (17)), cuyo espectro resultante se presenta en la Figura 14.

Figura 14

Espectro del coeficiente de amplificación sísmica (C) (NTE- E.031).



Se definieron dos espectros de pseudo-aceleraciones según el nivel sísmico de análisis: el primero correspondiente al Sismo Máximo Considerado (SMC), con un período de retorno de 2,500 años y un factor de modificación espectral de 1.5; y el segundo correspondiente al sismo de diseño, con un período de retorno de 500 años y un factor de modificación de 1.0. Ambos espectros, obtenidos a partir del factor de escala calculado, los cuales se presentan en la Figura 15

Periodo de retorno de 2500 años

$$Factor\ U1 = \frac{1.5 \times Z \times U \times S_x \times g}{R}$$

$$Factor\ U1 = \frac{1.5 \times 0.35 \times 1 \times 1.15 \times 9.81}{1}$$

$$Factor\ U1 = 5.922 \text{ m/s}^2$$

$$Factor\ U2 = 5.922 * 30\% = 1.776m/s^2$$

Periodo de retorno de 500 años

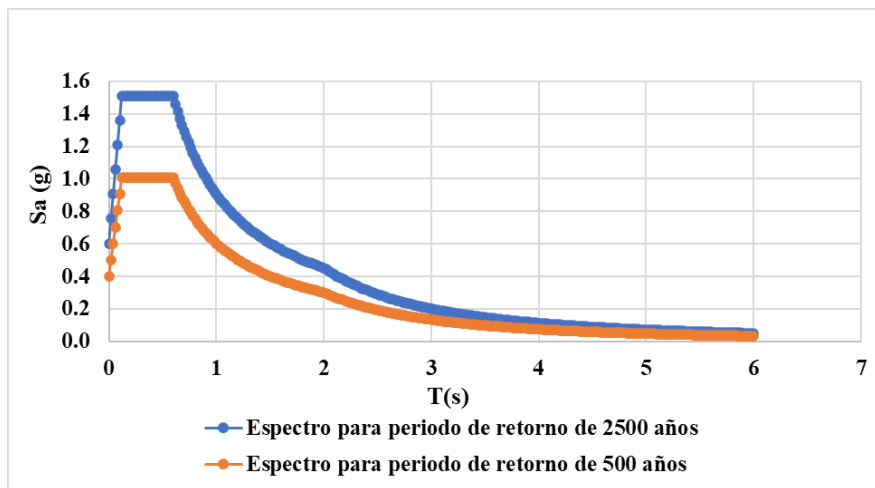
$$Factor\ U1 = \frac{ZxUxSxg}{R}$$

$$Factor\ U1 = \frac{0.35x1x1.15x9.81}{1} = 3.949m/s^2$$

$$Factor\ U2 = 3.949 * 30\% = 1.184m/s^2$$

Figura 15

Espectro de pseudo aceleraciones con la NTE E.031



3.4.5.2.3. Análisis Tiempo historia base aislada y base fija

3.4.5.2.3.1. Selección y Escalamiento de Registros Sísmicos Históricos

Para evaluar la respuesta dinámica de la estructura bajo condiciones reales de demanda sísmica, se seleccionaron ocho pares de registros sísmicos correspondientes a eventos de gran magnitud ocurridos en el Perú. Estos registros, obtenidos de la base de datos sísmicos nacional, incluyen eventos emblemáticos como los terremotos de Chimbote (1970), Lima (1966, 1970, 1974), Ica (2007), Moquegua (2021), Moyobamba (2005) y Ocoña (2021).

3.4.5.2.3.2. Seismo Signal y Seismo Match

Para la corrección de registros sísmicos se usaron dos programas: el SeismoSignal y el SeismoMatch. El primero se utilizó para hacer la corrección de línea base, el cual sirve para centrar el acelerograma alrededor de un eje horizontal (durante el registro sísmico, el sensor puede tener un desplazamiento que no corresponde al movimiento real del suelo) y que la señal regrese a cero; y el filtrado por ruido se aplica para eliminar componentes

de la señal que no corresponden al movimiento sísmico real, sino que son interferencias externas o limitaciones del instrumento. El ruido instrumental generalmente aparece en frecuencias muy altas o muy bajas, por lo que se aplica un filtro pasa-banda que conserva solo el rango de frecuencias de interés sísmico.

Como resultado, se obtuvo un registro procesado, para posteriormente, llevar los datos al segundo programa SeismoMatch, con el cual se efectuó el ajuste espectral (spectrum matching) que consiste en la modificación de la señal en el dominio de las frecuencias mediante un proceso iterativo, sin alterar significativamente las características generales del registro original, esto con el fin de que el espectro del registro procesado se aproxime al espectro objetivo definido por la norma.

3.4.5.2.3.3. Componentes ortogonales

Es importante el procesamiento de los componentes ortogonales (E-W y N-S) de cada registro, calculando su pseudo-aceleración elástica (S_a), procediendo a determinar la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS) de ambos componentes para obtener una respuesta espectral combinada que represente la demanda total. Hay que tener en cuenta que los factores de escala (como 0.44 y 0.90), permitieron ajustar la amplitud de los registros históricos para cumplir con el umbral mínimo para el espectro del SMC. Finalmente, dichos coeficientes fueron multiplicados por la aceleración de la gravedad ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$) para obtener los factores de escala definitivos, garantizando la consistencia de unidades en el software de modelado y la obtención de respuestas estructurales en magnitudes físicas reales, como se muestra a continuación

Tabla 7

Factores de escala

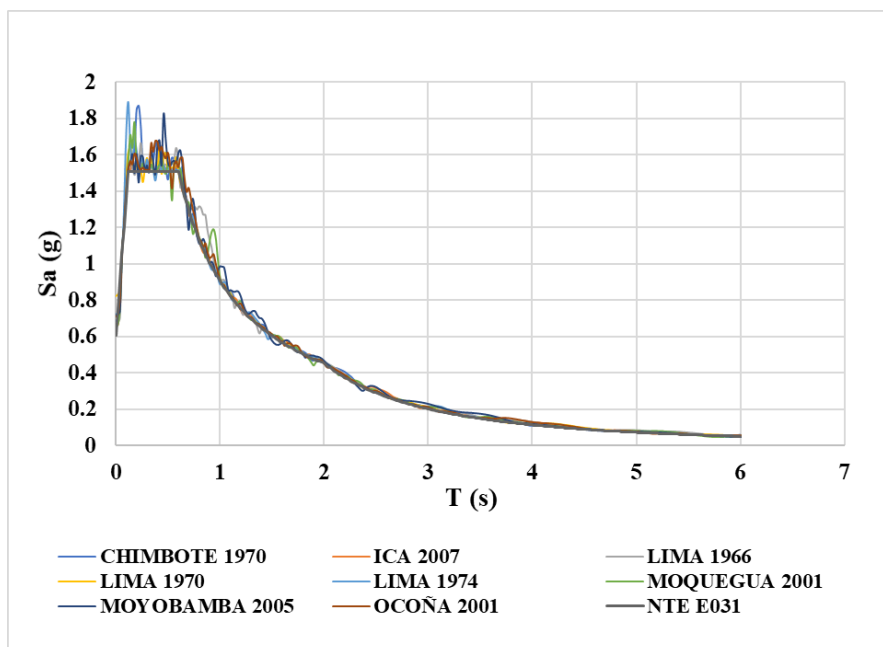
Registros Sísmicos	FACTOR DE ESCALA			
	Factores iniciales		Factores afectados por la gravedad	
	EW	NS	EW	NS
Chimbote 1970	0.440	0.900	4.316	8.829
Ica 2007	0.900	0.440	8.829	4.316
Lima 1966	0.440	0.900	4.316	8.829
Lima 1970	0.440	0.900	4.316	8.829
Lima 1974	0.900	0.440	8.829	4.316
Moquegua 2005	0.900	0.440	8.829	4.316
Moyobamba 2005	0.900	0.440	8.829	4.316
Ocoña 2021	0.440	0.898	4.316	8.809

3.4.5.2.3.4. Espectros sísmicos escalados

A continuación, se presenta la superposición de los espectros individuales de los ocho registros frente al espectro normativo de la E.031 para zona 3, suelo tipo S2, donde se observa que, si bien cada sismo presenta picos de aceleración en distintos períodos debido a sus características de fuente y sitio, la envolvente promedio mantiene consistencia, asegurando que el análisis dinámico capture la variabilidad e incertidumbre propia de la acción sísmica en la región.

Figura 16

Espectros de respuesta elásticos compatibilizados



3.4.5.2.3.5. Verificación de Compatibilidad de Registros y Sismo Máximo (SMC)

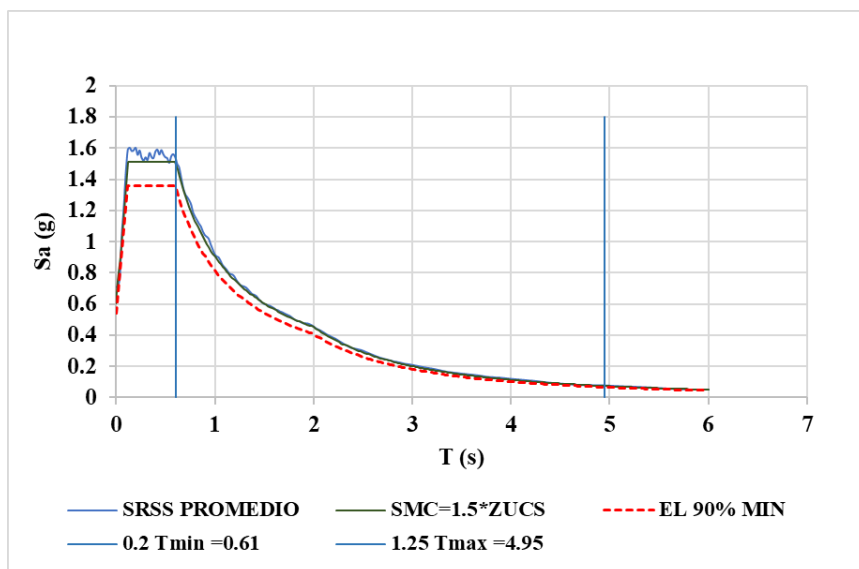
En la siguiente Figura, se presenta la comparación del espectro promedio (SRSS Promedio) obtenido de la base de datos sísmica frente al espectro normativo. Los resultados se analizaron bajo los siguientes criterios técnicos:

- Rango de Períodos de Interés: Se delimitaron los límites críticos de control representados por las líneas verticales azules. El límite inferior se estableció en $0.2 \times T_{\min} = 0.2 \times 3.030 = 0.61$ s, y el límite superior en $1.25 \times T_{\max} = 1.25 \times 3.959 = 4.95$ s.
- Criterio del 90% Mínimo: Se incluyó el límite inferior del 90% del espectro normativo (línea punteada roja). Se observa que el espectro promedio de los registros se mantiene consistentemente por encima de este umbral en todo el rango

de períodos evaluado, cumpliendo estrictamente con el requisito de aceptabilidad de la Norma E.031.

Figura 17

Verificación espectral



Aclaración sobre el análisis tiempo historia de base fija

Con fines exclusivamente investigativos, en el presente análisis de tiempo historia para el sistema de base fija se ha prescindido de la caracterización no lineal de los elementos estructurales de la superestructura, a diferencia de lo que establece el procedimiento normativo completo.

La Norma Técnica Peruana E.030 establece que, para llevar a cabo un análisis tiempo historia en base fija de manera rigurosa, es necesario definir previamente el comportamiento no lineal de los elementos que conforman la superestructura (incluyendo la definición de rótulas plásticas, curvas momento-curvatura y los límites de deformación última admisibles) a fin de conocer la capacidad máxima de la estructura antes de alcanzar el colapso. Solo a partir de dicha caracterización es posible evaluar con precisión la respuesta inelástica bajo registros sísmicos reales.

Sin embargo, dado que el alcance de la presente tesis no comprende el estudio de la no linealidad en los elementos de la superestructura, el análisis tiempo historia de base fija se ha ejecutado de forma simplificada: se han aplicado directamente los registros sísmicos seleccionados sobre el modelo estructural sin incorporar la definición de comportamiento

inelástico en los elementos. En consecuencia, la estructura responde en todo momento dentro del rango elástico.

Esta simplificación se justifica en el marco comparativo del estudio, donde el objetivo es evaluar el comportamiento relativo entre ambos sistemas bajo las mismas condiciones de análisis, y no obtener una estimación absoluta de la demanda inelástica de la superestructura. Por tanto, la no inclusión de la no linealidad estructural no invalida la comparación realizada, sino que delimita su alcance dentro del contexto investigativo de la presente tesis.

3.4.5.3. Diseño del sistema de aislamiento

Estructura con base fija como base del aislamiento sísmico

Se hace un modelo aparte para sacar el periodo el cual va a constituir la parte inicial del análisis con base aislada, hay que tener en cuenta que este modelo no tiene que ir con placas ni se tiene que cambiar la estructura para que tenga una similitud casi idéntica con el modelo de base aislada que estamos avanzando

Tabla 8

Periodo y masa efectiva

Case	Mode	Period	UX	UY	RZ
Modal	1	0.892	0.000	0.834	0.001
Modal	2	0.889	0.835	0.000	0.000
Modal	3	0.835	0.000	0.001	0.836

Tabla 9

Masa de la estructura

Nombre	Elevación (m)	Masa (tonf-s ² /m)
AZOT	16	297.7
TECHO 3	12	525.5
TECHO 2	8	532.9
TECHO 1	4	533.0

Tras completar el análisis del edificio con base fija, obtuvimos un periodo fundamental de vibración de 0.892 segundos, parámetro crucial que marca el punto de transición hacia el diseño del sistema de aislamiento sísmico. El cual se convierte en el dato de entrada más relevante para el sistema de aislamiento.

Para un diseño adecuado del sistema de aislamiento, buscaremos aumentar este período entre 3 y 4 veces su valor original, lo que permitirá una reducción significativa de las fuerzas sísmicas transmitidas a la estructura. Procederé a predimensionar los dispositivos de aislamiento considerando la masa total del edificio y este período de base fija, estableciendo así las bases para un sistema que proporcionará el comportamiento dinámico deseado

3.4.5.3.1. Propiedades lineales del sistema de aislamiento

El prediseño lineal del sistema de aislación constituye el punto de partida del proceso iterativo de diseño. Se define un período objetivo (T_b) que determina la flexibilidad del sistema; siendo fundamental para alejar la estructura de la zona de altas aceleración. La fracción de amortiguamiento (ξ) cuantifica la capacidad del sistema para disipar energía, y a partir de ella se obtiene el factor de amortiguamiento (B_M), que reduce la demanda espectral, la rigidez efectiva (K_{eff}), sirve para saber cuánta rigidez total necesita el sistema para alcanzar el período objetivo deseado. La pseudoaceleración espectral (S_a) representa la demanda sísmica que deberá resistir el sistema, mientras que el desplazamiento espectral (S_d) es la demanda de desplazamiento asociada al sistema de aislamiento.

Tabla 10

Sistema aislación:

Diseño de sistema de aislación	
Cantidad de dispositivos	88.00
Período objetivo (base aislada), T_b [s]	3.442
Fracción de amortiguamiento, ξ	15%
Factor de amortiguamiento, B_M	1.35
Masa sísmica total, $M_T = M_S + M_B$ [tonf.s ² .m ⁻¹]	2494.83
Rigidez efectiva o secante, $K_{eff} = (2 * \pi / T_b)^2 * M_T$ [tonf.m ⁻¹]	8313.23
Amortiguamiento crítico, $C_{cr} = 2 * (K_{eff} * M_T)^{0.5}$ [tonf.s.m ⁻¹]	9108.26
Amortiguamiento del sistema de aislación, $C_b = \xi * C_{cr}$ [tonf.s.m ⁻¹]	1366.24
Factor de amplificación sísmica, C	0.2532
Pseudoaceleración elástica SMC, $S_{aM} = 1.5 * Z * U * S * C$ [g]	0.1529
Pseudoaceleración espectral, $S_a = S_{aM} / B_M$ [g]	0.1132
Desplazamiento elástico SMC, $S_{dM} = (T_b / (2 * \pi))^2 * S_{aM}$ [cm]	44.99
Desplazamiento espectral, $S_d = (T_b / (2 * \pi))^2 * S_a$ [cm]	
Ref.: Ec. 6, artículo 20, Norma E.031.	33.33
Desplazamiento traslacional en el centro de rigidez (CR), $D_M = S_d$ [cm]	33.33
Desplazamiento en el CR, $D'_M = D_M / (1 + (T_f / T_M)^2)^{0.5}$ [cm]	32.26

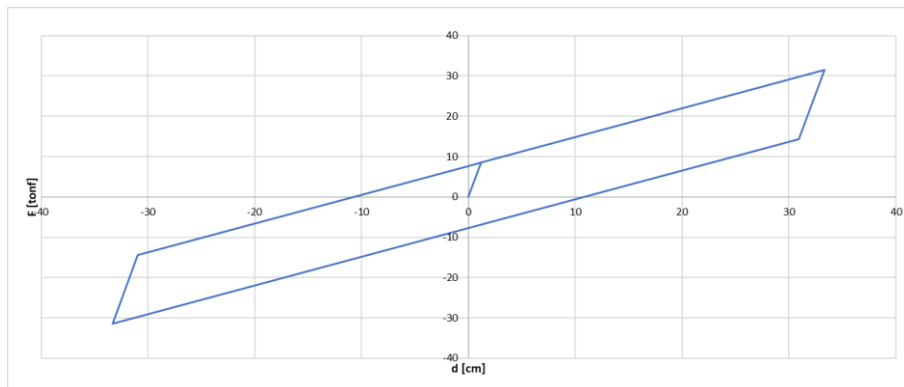
3.4.5.3.2. Propiedades no lineales por dispositivo

3.4.5.3.2.1. Propiedades nominales

Las propiedades nominales de los dispositivos representan el comportamiento esperado del aislador bajo condiciones de fabricación estándar, sin variaciones por envejecimiento, temperatura o contaminación. La rigidez elástica (k_1) es la rigidez inicial del dispositivo antes de que el núcleo de plomo fluya, siendo determinante para el comportamiento ante sismos de baja intensidad. La rigidez inelástica (k_2) representa la rigidez post-fluencia, que controla el desplazamiento máximo del aislador. La fuerza característica (Q_d) define la capacidad de disipación de energía del núcleo de plomo, y junto con k_2 determina la forma del lazo de histéresis. El desplazamiento post-fluencia (Δy) y la fuerza de fluencia (F_y) delimitan el inicio del comportamiento no lineal del dispositivo. La rigidez efectiva (K_{eff}) es la rigidez secante en el desplazamiento de diseño, utilizada para calcular el período efectivo del sistema. El área de histéresis (A_h) cuantifica la energía disipada por ciclo en el dispositivo individual, el cual está relacionado a la fracción de amortiguamiento efectivo (ξ). La verificación de convergencia ($DM/S_d = 1$) confirma que las propiedades no lineales del dispositivo son consistentes con la demanda de desplazamiento calculada

Tabla 11*Propiedades nominales*

Descripción	LRB	SMC
Rigidez elástica, k_1 [tonf.m ⁻¹]	713.80	62814.49
Rigidez inelástica, k_2 [tonf.m ⁻¹]	71.38	6281.45
Fuerza característica a cero desplazamientos, q_d [tonf]	7.69	677.15
Desplazamiento post fluencia, $\Delta_y = q_d/(k_1-k_2)$ [cm]	1.20	1.20
Fuerza de fluencia, $f_y = \Delta_y * k_1$ [tnf]	8.55	
Desplazamiento, D_M [cm]		33.328
Fuerza en el desplazamiento máximo de aislador, $f_M = q_d + k_2 * D_M$ [tnf]	31.48	2770.61
Rigidez efectiva, $k_{eff} = f_M/D_M$ [tonf.m ⁻¹]	94.47	8313.23
Peso sísmico, W [tonf]		25894.61
Masa sísmica total, M_T [tonf.s ² .m ⁻¹]		2640.52
Período efectivo, $T_E = 2 * \pi * (M_T/K_{eff})^{0.5}$ [s]		3.541
Área de histéresis, $a_h = 4 * q_d * (D_M - \Delta_y)$ [tonf.m]	9.8894	870.27
Amortiguamiento*, $\xi = A_h / (2 * \pi * K_{eff} * D_M^2)$	15.00%	15.00%
Amortiguamiento del dispositivo, c_b [tonf.s.m ⁻¹]	15.972	1405.56
Factor de amortiguamiento, B		1.35
Factor de amplificación sísmica, C		0.239
Aceleración espectral, $S_a = 1.5 * Z * U * S * C / B_M$ [g]		0.107
Desplazamiento espectral, $S_d = (T_b / (2 * \pi))^2 * S_a$ [cm]		33.328
Ref.: Ec. 6, artículo 20, Norma E.031.		
Comprobar convergencia, $D_M/S_d = 1$		1.000
Desplazamiento en el CR, $D'_M = D_M / (1 + (T_f/T_M)^2)^{0.5}$ [cm]		32.32
Fuerza restitutiva, $Fr = F_M - (Q_d + D_M * K_2/2) = D_M * K_2/2$ [tonf]		1046.73

Figura 18*Curva bilineal nominal de dispositivos de aislamiento*

3.4.5.3.2.2.Límite superior

El límite superior aplica factores de modificación ($\lambda_{\max}$) que incrementan la rigidez post fluencia (K_2) y la fuerza característica (Q_d) del dispositivo, representando condiciones desfavorables como bajas temperaturas, envejecimiento temprano o variabilidad de fabricación que endurecen el material. Este estado es el más crítico para las **fuerzas**, ya que una mayor rigidez efectiva (K_{eff}) genera un período efectivo menor y una pseudoaceleración espectral mayor, resultando en fuerzas sísmicas más elevadas transmitidas a la superestructura, lo que a su vez incrementa el cortante en la interface de aislación. El área de histéresis (A_h) es mayor en este estado, lo que, si bien implica mayor disipación de energía, lo que podría implicar mayores aceleraciones en la super estructura. La rigidez efectiva y el cortante máximo obtenidos bajo límite superior son los parámetros que gobiernan el diseño estructural de la superestructura y de los elementos de la interface, como vigas de transferencia, conectores y anclajes del aislador

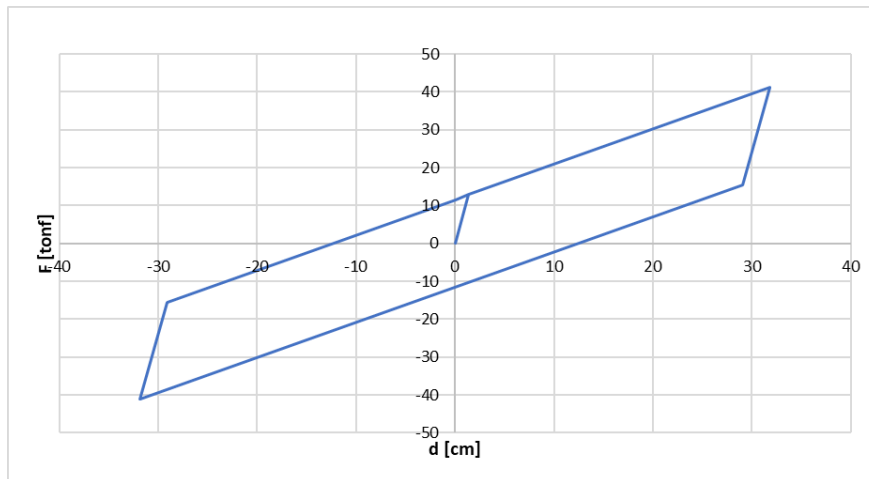
Tabla 12

Límite superior:

Descripción	LRB	SMC
Factor de modificación máximo K_2 o k_{eff} (lineales), $\lambda_{\max}$	1.3	
Factor de modificación máximo Q_d ó μ , $\lambda_{\max}$	1.5	
Relación $\alpha=k_1/k_2$	10.00	
Rigidez elástica, k_1 [tonf.m ⁻¹]	927.94	81658.83
Rigidez inelástica, k_2 [tonf.m ⁻¹]	92.79	8165.88
Fuerza característica a cero desplazamientos, q_d [tonf]	11.54	1015.72
Desplazamiento post fluencia, $\Delta_y=q_d/(k_1-k_2)$ [cm]	1.382	0.000
Fuerza de fluencia, $f_y=\Delta_y*k_1$ [tnf]	12.82	
Desplazamiento, D_M [cm]		31.84
Fuerza en el desplazamiento máximo de aislador, $f_M=q_d+k_2*D_M$ [tnf]	41.08	3615.39
Rigidez efectiva, $k_{\text{eff}}=f_M/D_M$ [tonf.m ⁻¹]	129.05	11356.39
Peso sísmico, W [tonf]		25894.61
Masa sísmica total, M_T [tonf.s ² .m ⁻¹]		2640.52
Período efectivo, $T_E=2*\pi*(M_T/K_{\text{eff}})^{0.5}$ [s]		3.03
Área de histéresis, $a_h=4*q_d*(D_M-\Delta_y)$ [tonf.m]	14.0602	1237.29
Amortiguamiento, $\xi=A_h/(2*\pi*K_{\text{eff}}*D_M^2)$	17.11%	17.11%
Amortiguamiento del dispositivo, c_b [tonf.s.m ⁻¹]	21.293	1873.78
Factor de amortiguamiento, B		1.41
Factor de amplificación sísmica, C		0.33
Aceleración espectral, $S_a=1.5*Z*U*S*C/B_M$ [g]		0.139619
Desplazamiento espectral, $S_d=(T_b/(2*\pi))^2*S_a$ [cm]		
Ref.: Ec. 6, artículo 20, Norma E.031.		31.84
Comprobar convergencia, $D_M/S_d=1$		1.00
Desplazamiento en el CR, $D'_M=D_M/(1+(T_E/T_M)^2)^{0.5}$ [cm]		30.54
Fuerza restitutiva, $F_r=F_M-(Q_d+D_M*K_2/2)=D_M*K_2/2$ [tonf]		1299.83

Figura 19

Curva bilineal superior de dispositivos de aislamiento



3.4.5.3.2.3.Límite inferior

El límite inferior se obtiene aplicando factores de modificación ($\lambda_{\min}$) que reducen la rigidez y la fuerza característica del dispositivo, simulando condiciones que disminuyen su resistencia, como el envejecimiento del elastómero o condiciones de temperatura elevada. Este estado es el más crítico para los **desplazamientos**, ya que una menor rigidez implica mayor flexibilidad del sistema y por tanto mayores desplazamientos máximos (DM). La rigidez elástica e inelástica reducidas generan un lazo de histéresis más angosto, con menor área (A_h) y menor amortiguamiento efectivo, lo que incrementa la demanda de desplazamiento sobre el dispositivo. La fuerza restitutiva (F_r) en este estado es menor, por lo que es crítico verificar que el sistema siga teniendo capacidad de recentrado. El desplazamiento máximo obtenido bajo límite inferior define la capacidad de deformación que debe tener el dispositivo físicamente, es decir, gobierna el dimensionamiento geométrico del aislador (diámetro, altura de goma). La convergencia $DM/S_d = 1$ debe verificarse también en este estado para garantizar consistencia del diseño

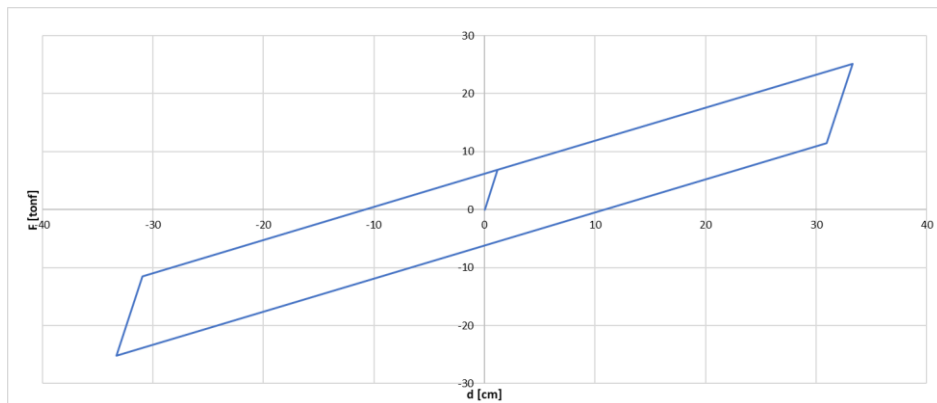
Tabla 13

Límite inferior:

Descripción	LRB	SMC
Factor de modificación mínimo K_d , $\lambda_{\min}$	0.8	
Factor de modificación mínimo Q_d , $\lambda_{\min}$	0.8	
Relación $\alpha=k_1/k_2$	10.00	
Rigidez elástica, k_1 [tonf.m ⁻¹]	571.04	50251.59
Rigidez inelástica, k_2 [tonf.m ⁻¹]	57.10	5025.16
Fuerza característica a cero desplazamientos, q_d [tonf]	6.16	541.72
Desplazamiento post fluencia, $\Delta_y = q_d/(k_1-k_2)$ [cm]	1.198	0.000
Fuerza de fluencia, $f_y = \Delta_y * k_1$ [tnf]	6.84	601.91
Desplazamiento, D_M [cm]		33.328
Fuerza en el desplazamiento máximo de aislador, $f_M = q_d + k_2 * D_M$ [tnf]	25.19	2216.49
Rigidez efectiva, $k_{\text{eff}} = f_M / D_M$ [tonf.m ⁻¹]	75.57	6650.58
Peso sísmico, W [tonf]		25894.61
Masa sísmica total, M_T [tonf.s ² .m ⁻¹]		2640.52
Período efectivo, $T_E = 2 * \pi * (M_T / K_{\text{eff}})^{0.5}$ [s]		3.96
Área de histéresis, $a_h = 4 * q_d * (D_M - \Delta_y)$ [tonf.m]	7.9115	696.21
Amortiguamiento, $\xi = A_h / (2 * \pi * K_{\text{eff}} * D_M^2)$	15.00%	15.00%
Amortiguamiento del dispositivo, c_b [tonf.s.m ⁻¹]	14.286	
Factor de amortiguamiento, B		1.35
Factor de amplificación sísmica, C		0.19
Aceleración espectral, S_a [g]		0.09
Desplazamiento espectral, S_d [cm]		
(Ec. 6, artículo 20, norma E.031)		33.328
Comprobar convergencia, $D_M / S_d = 1$		1.00
Desplazamiento en el CR, $D'_M = D_M / (1 + (T_f / T_M)^2)^{0.5}$ [cm]		32.51
Fuerza restitutiva, $Fr = F_M - (Q_d + D_M * K_2 / 2) = D_M * K_2 / 2$ [tonf]		837.39

Figura 20

Curva bilineal inferior de dispositivos de aislamiento



3.4.5.3.3. Propiedades no lineales del sistema de aislamiento

3.4.5.3.3.1. Propiedades nominales

Los resultados del sistema bajo estado nominal representan la respuesta esperada del conjunto de aisladores trabajando en paralelo bajo condiciones de fabricación estándar. El desplazamiento máximo (D_{max}) y mínimo (D_{min}) del sistema indican el rango de movimiento de la interfaz de aislación ante cada registro sísmico, siendo esenciales para verificar que el desplazamiento no exceda la capacidad física del dispositivo. La cortante máxima (V_{max}) y mínima (V_{min}) representan las fuerzas horizontales totales que el sistema transmite a la cimentación y a la superestructura.

Tabla 14*Propiedades nominales*

Y-Y	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
D_{máx} [cm]	19.48	21.0	23.2	27.7	22.4	20.1	25.2	19.6	22.36
D_{min} [cm]	-16.1	-16.3	-17.2	-20.1	-18.6	-13.5	-20.4	-15.8	-17.24
V_{máx} [tonf]	1840.3	1971.6	1803.1	2332.8	1997.0	1877.5	1964.2	1862.3	1956.08
V_{min} [tonf]	-1611.7	-1677.2	-1710.4	-1907.3	-1843.6	-1537.4	-1962.7	-1601.7	-1731.50
K_{eff} [tonf/m]	9612.9	9800.8	8699.0	8861.1	9383.2	10178.5	8602.2	9804.7	9310.90
E ciclo [tonf.m]	453.9	471.8	514.6	615.6	521.9	421.9	585.8	446.0	503.92
β_{eff}	23.31%	22.11%	23.08%	19.32%	21.14%	23.44%	20.80%	23.20%	21.97%

Tabla 15*Cortante en la super estructura para propiedades nominales*

Cortante superestructura	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
V_{st_TH} máx [tonf]	1376.9	1842.6	1621.0	1952.8	1543.3	1585.4	1773.4	1715.2	1676.3
V_{st_TH} min [tonf]	-1531.2	-1647.1	-1672.7	-1704.4	-1487.0	-1746.5	-1543.0	-1607.1	-1617.4

Tabla 16*Desplazamientos total máximo para propiedades nominales*

Y-Y	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
D_{TM_TH} [cm]	19.54	24.01	27.27	29.91	22.54	22.79	32.13	18.81	25.46

3.4.5.3.3.2.Límite superior

Bajo el estado límite superior, las propiedades aumentadas de cada dispositivo generan un sistema globalmente más rígido, con períodos efectivos menores y mayores fuerzas sísmicas. La cortante máxima (V_{max}) bajo este estado es el parámetro que gobierna el diseño de la superestructura, ya que representa la mayor fuerza horizontal que el sistema de aislación transmitirá a los elementos estructurales superiores. Esta cortante define las demandas de diseño de vigas de transferencia, columnas del primer nivel, anclajes y conectores de los aisladores. El D_{max} en límite superior es menor que en límite inferior debido a la mayor rigidez, pero el V_{max} es significativamente mayor, lo que evidencia el compromiso entre desplazamiento y fuerza que caracteriza el diseño de sistemas de aislación. La K_{eff} global aumentada y el β_{eff} elevado indican mayor disipación, pero a costa de transmitir más fuerza. El E_{ciclo} mayor confirma que los dispositivos trabajan con lazos de histéresis más amplios en fuerza, siendo este el estado que define las demandas máximas sobre la estructura y la cimentación.

Tabla 17*Propiedades superiores*

Y-Y	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
Dmáx [cm]	15.2	17.1	20.6	26.2	22.4	18.6	24.5	18.2	20.36
Dmin [cm]	-14.3	-15.2	-15.4	-21.4	-13.3	-13.6	-17.7	-16.4	-15.93
Vmáx [tonf]	2144.7	2282.9	2343.4	3076.5	2671.2	2479.1	3026.7	2428.9	2556.67
Vmin [tonf]	-2110.8	-2221.2	2221.7	-2699.3	-2095.0	-2021.7	-2158.7	-2262.9	-1665.99
Keff [tonf/m]	14415.4	13923.0	12659.8	12128.8	13332.1	13898.1	12314.0	13532.9	13275.53
E ciclo [tonf.m]	599.7	657.2	732.5	967.4	726.2	654.9	855.4	704.3	737.21
βeff	30.39%	28.71%	28.33%	22.39%	27.13%	28.86%	24.94%	27.56%	26.84%

Tabla 18*Cortante en la super estructura*

Cortante superestructura	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
V_{st_TH} máx [tonf]	1798.3	2119.9	2265.4	2332.1	2513.6	2085.1	2223.3	2530.1	2233.48
V_{st_TH} min [tonf]	-2504.6	-2270.6	-2119.0	-2620.1	-2534.4	-2545.1	-2521.1	-2563.3	-2556.70

Tabla 19*Cortante en la super estructura para todos los niveles*

Nivel (MIN)	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
AZOT	775.30	773.02	1116.77	658.05	827.28	716.39	873.24	727.23	808.41
TECHO 3	1632.16	1591.82	2147.02	1345.42	1755.83	1573.69	1810.99	1681.97	1692.36
TECHO 2	2183.33	1978.91	2198.82	2115.92	2062.70	1863.65	1881.04	2000.93	2035.66
TECHO 1	2204.58	2270.57	2119.01	2720.11	2034.42	2245.14	2021.14	2263.35	2234.79
Cortante máxima	2204.58	2270.57	2198.82	2720.11	2062.70	2245.14	2021.14	2263.35	2248.30

Tabla 20*Derivas de entrepiso*

Nivel (MAX)	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
AZOT	0.00207	0.00223	0.00290	0.00186	0.00245	0.00220	0.00233	0.00223	0.00228
TECHO 3	0.00331	0.00320	0.00423	0.00315	0.00357	0.00343	0.00354	0.00367	0.00351
TECHO 2	0.00409	0.00366	0.00421	0.00407	0.00386	0.00363	0.00364	0.00442	0.00395
TECHO 1	0.00278	0.00276	0.00277	0.00327	0.00281	0.00260	0.00264	0.00311	0.00284

Tabla 21*Aceleración*

Nivel	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
AZOT	0.37	0.35	0.40	0.25	0.34	0.35	0.26	0.30	0.33
TECHO 3	0.18	0.19	0.19	0.15	0.20	0.22	0.21	0.23	0.20
TECHO 2	0.13	0.12	0.15	0.14	0.14	0.17	0.15	0.15	0.14
TECHO 1	0.21	0.15	0.13	0.14	0.19	0.16	0.20	0.19	0.17
Aceleraciones máximas	0.37	0.35	0.40	0.25	0.34	0.35	0.26	0.30	0.33

Tabla 22*Desplazamientos*

Y-Y	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
D_{TM_TH} [cm]	18.62	20.09	25.99	28.97	25.29	18.61	25.54	19.84	23.30

3.4.5.3.3.3. Límite inferior

Bajo el estado límite inferior, las propiedades reducidas de cada dispositivo se trasladan al comportamiento global del sistema, resultando en una respuesta más flexible con mayores desplazamientos. El D_{max} bajo este estado es el valor de desplazamiento máximo que gobierna, ya que representa el escenario donde el sistema es menos rígido y por tanto se desplaza más. Este valor debe ser menor que la capacidad de desplazamiento del dispositivo para garantizar que no falle por agotamiento de su deformación máxima. El D_{min} permite verificar el desplazamiento en dirección opuesta, importante para el diseño de juntas sísmicas y separaciones entre la estructura aislada y los elementos fijos. La K_{eff} reducida del sistema implica un período efectivo mayor, alejándose aún más de las frecuencias dominantes del sismo, lo cual es beneficioso para la aceleración, pero crítico para el espacio requerido. El E_{ciclo} y β_{eff} disminuidos en este estado confirman la menor capacidad de disipación, incrementando la demanda de desplazamiento y evidenciando el escenario más exigente para el dimensionamiento físico del aislador.

Tabla 23*Propiedades inferiores*

Y-Y	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
Dmáx [cm]	18.5	16.7	21.5	29.9	20.9	22.2	30.7	19.6	22.5
Dmin [cm]	-15.4	-22.3	-19.6	-14.8	-20.1	-16.9	19.6	-17.9	-13.4
Vmáx [tonf]	1452.1	1627.8	1407.4	1956.5	1522.4	1587.4	1873.7	1487.9	1614.4
Vmin [tonf]	-1317.3	-1359.4	-1403.9	-1223.6	-1501.9	-1331.6	-1457.4	-1440.4	-1379.4
Keff [tonf/m]	8174.0	7659.6	6835.1	7126.9	7383.5	7473.0	6629.2	7823.4	7388.1
E ciclo [tonf.m]	367.1	422.5	445.6	483.4	443.8	423.2	544.4	405.5	388.9
βeff	24.91%	23.09%	24.53%	21.69%	22.81%	23.63%	428.19%	23.55%	26.01%

Tabla 24*Derivas de entrepiso*

Nivel (MIN)	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
AZOT	0.00108	0.00146	0.00173	0.00136	0.00143	0.00140	0.00134	0.00142	0.00140
TECHO 3	0.00182	0.00240	0.00261	0.00208	0.00221	0.00225	0.00198	0.00225	0.00220
TECHO 2	0.00226	0.00265	0.00280	0.00216	0.00247	0.00266	0.00244	0.00248	0.00249
TECHO 1	0.00161	0.00194	0.00192	0.00179	0.00164	0.00190	0.00179	0.00162	0.00178
Deriva máxima	0.00226	0.00265	0.00280	0.00216	0.00247	0.00266	0.00244	0.00248	0.00249

Tabla 25*Desplazamientos*

Y-Y	CHIMBOTE 1970	ICA 2007	LIMA 1966	LIMA 1970	LIMA 1974	MOQUEGUA 2021	MOYOBAMBA 2005	OCOÑA 2021	Promedio
D_{TM_TH} [cm]	20.74	25.77	25.80	30.72	24.12	24.43	34.52	22.06	26.02

Tabla 26*Landa mínimo*

Descripción	Espec. XX EY+	Espec. XX EY-	Espec. YY EX+	Espec. YY EX-
Desplazamiento traslacional en la base dirección análisis, D _{M_b} [cm]	37.00	37.00	37.00	36.00
Desplazamiento traslacional en la azotea dirección análisis, D _{M_a} [cm]	40.00	39.00	39.00	39.00
Desplazamiento traslacional en la base dirección ortogonal, D _{M_b} [cm]	13.00	13.00	14.00	13.00
Desplazamiento traslacional en la azotea dirección ortogonal, D _{M_a} [cm]	14.00	14.00	15.00	14.00
Desplazamiento total en la base dirección análisis, D _{TM_b} [cm]	39.22	39.22	39.56	38.28
Desplazamiento total relativo [cm]	3.00	2.00	2.00	3.00
D _{TM_b} /D _{TM} (procedimiento estático)	95.54%	95.54%	95.54%	92.96%
D _{TM_b} /D' _{TM} (procedimiento estático)	105.87%	103.23%	103.23%	103.23%
Cumple desplazamiento en la dirección de análisis D_{TM_b}≥80%	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple

3.4.5.3.4. Curva de Histéresis del Sistema de Aislamiento Sísmico

La curva de histéresis es la representación gráfica de la relación entre la fuerza lateral (eje vertical) y el desplazamiento del centro de gravedad (eje horizontal) de todos los aisladores trabajando en conjunto y la inclinación de la línea central representa la rigidez efectiva. Mostrando así la disipación de energía del sistema de aislamiento sísmico durante un evento sísmico, El área interna del lazo representa la energía que el aislador disipa para que no pase a la superestructura.

Figura 21

Curva de histéresis de lazo nominal

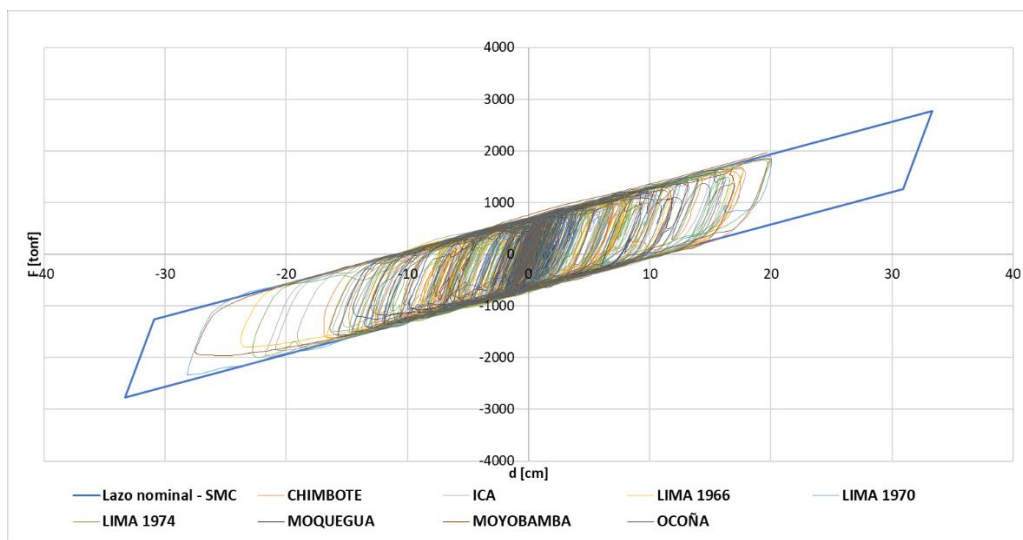


Figura 22

Curva de histéresis de lazo superior

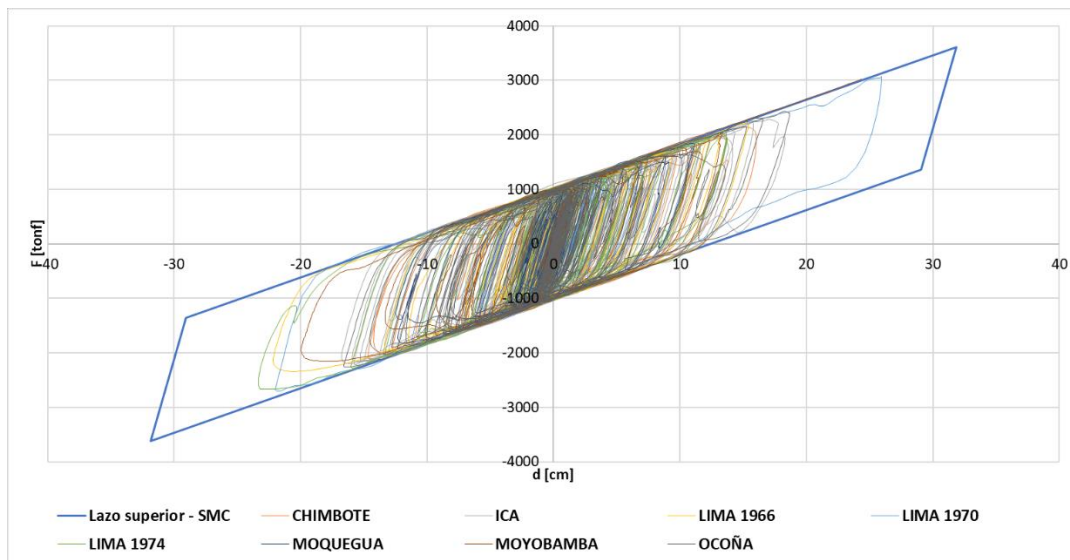


Figura 23

Curva de histéresis de lazo inferior

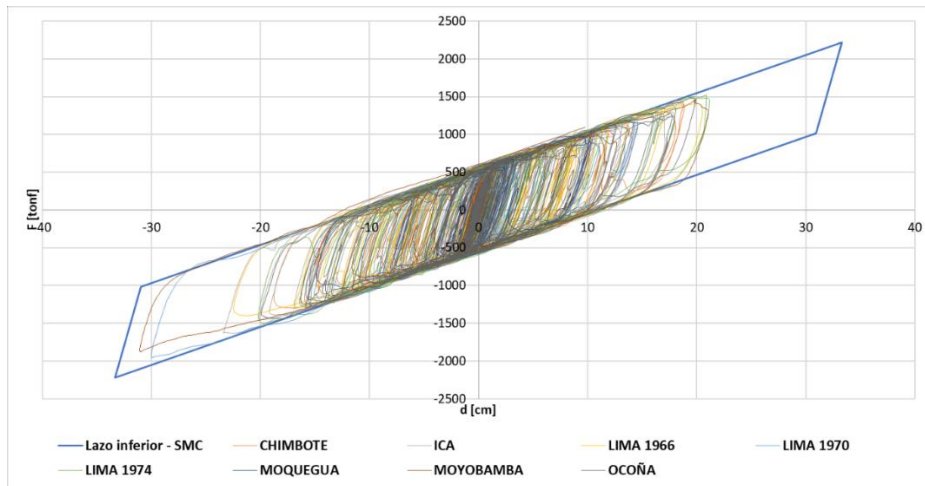
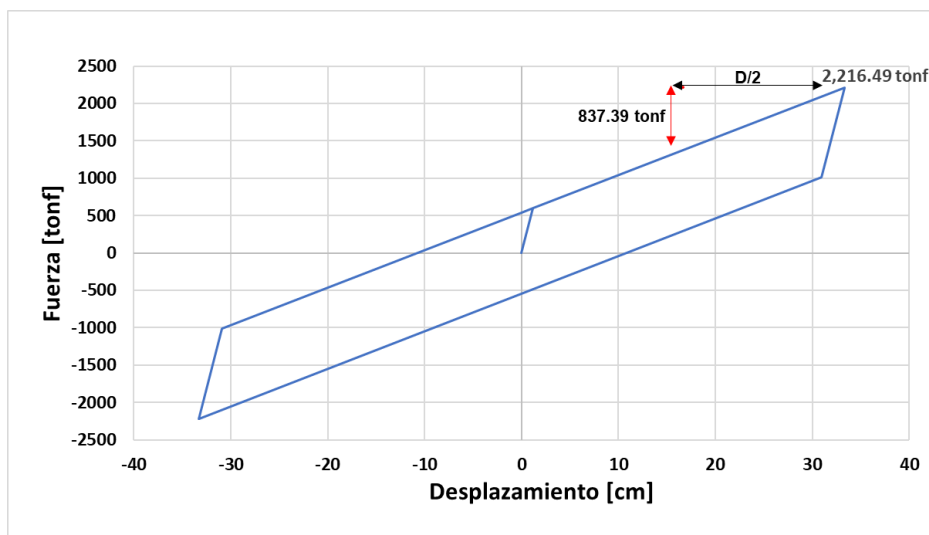
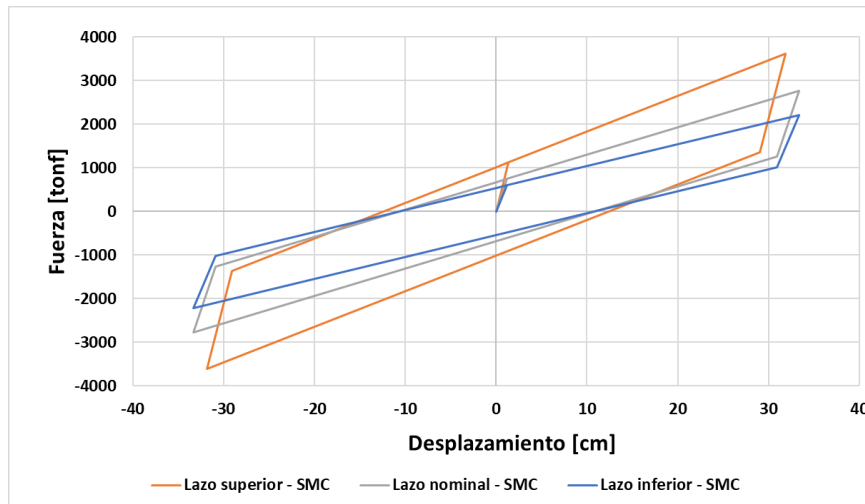


Figura 24

Landa mínima



En la presente tabla muestra las propiedades del sistema de aislamiento sísmico en tres escenarios (nominal, límite superior e inferior). Destaca el periodo fundamental de 3.03-3.96 segundos, confirmando el desacoplamiento sísmico exitoso con una relación T/T_t . El amortiguamiento del sistema alcanza 15-17%, con desplazamientos máximos de 31.8-33.3 cm. La fuerza lateral transmitida (F_r/W) resulta entre 3.23-5.02%, reduciendo significativamente las solicitaciones sísmicas sobre la superestructura.

Figura 25*Curva de histéresis***Tabla 27***Las propiedades finales:*

Descripción	Nominal	Límite superior	Límite inferior
Cantidad de dispositivos	88	88	88
Rigidez efectiva por dispositivo, K_{eff} [tonf.m ⁻¹]	94.5	129.0	75.6
Amortiguamiento del dispositivo, C_b [tonf.s.m ⁻¹]	16.0	21.3	14.3
Rigidez elástica por dispositivo, K_1 [tonf.m ⁻¹]	713.8	927.9	571.0
Fuerza de fluencia por dispositivo, F_y [tonf]	8.5	12.8	6.8
Rigidez inelástica por dispositivo, K_2 [tonf.m ⁻¹]	71.4	92.8	57.1
Desplazamiento post fluencia, Δ_y [cm]	1.2	1.4	1.2
Fuerza característica por dispositivo, Q_d [tonf]	7.7	11.5	6.2
Amortiguamiento dispositivo, ξ	15.00%	17.11%	15.00%
$P_{servicio}$ [tonf]	294.26	294.26	294.26
P_{max} [tonf]	600	600	600.00
Desplazamiento SMC, D_M [cm]	33.3	31.8	33.3
Fuerza restitutiva, F_r [tonf]	1046.7	1299.8	837.4
Amortiguamiento sistema, ξ	15.00%	17.11%	15.00%
F_r/W	4.04%	5.02%	3.23%
Q_d [tonf]	677.1	1015.7	541.7
Q_d/W	2.62%	3.92%	2.09%
Periodo T [seg]	3.54	3.03	3.96
Relación T/T_t	3.97	3.40	4.44
Valor C	0.199	0.272	0.159

Los análisis demostraron que el sistema aislado reduce significativamente desplazamientos laterales, derivas de entrepiso y cortante, mejorando la seguridad estructural del hospital frente a sismos, cumpliendo las normas NTE E.031 y E.030 y garantizando la funcional después de un evento sísmico con la atención hospitalaria.

3.4.5.3.5. Dispositivos y su verificación

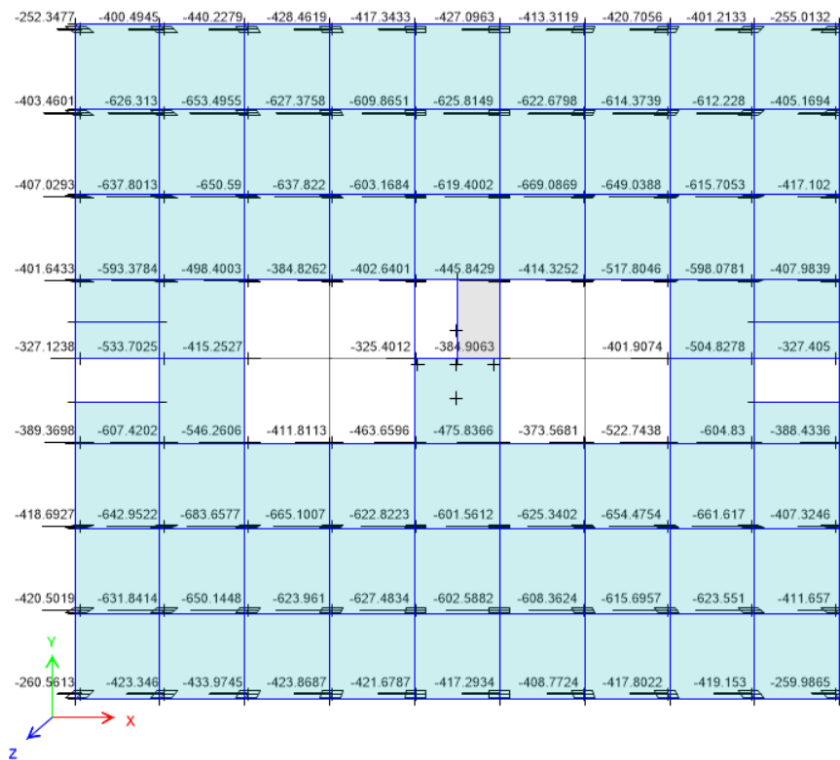
Se procede a realizar la validación con el catálogo, seleccionando los dispositivos comerciales y se procede a su primera verificación, así como también el establecimiento de la relación de rigideces y cálculo de la rigidez por dispositivo. De ahí se procede a realizar el cálculo de parámetros bilineales del aislador como son: Rigidez post-fluencia (k_2), rigidez inicial (k_1), fuerza característica (Q_d), fuerza de fluencia (f_y), fuerza máxima (f_m) y el área del lazo de histéresis (A_h).

3.4.5.3.6. Selección del tipo de aislador

Para la selección del tipo de aislador sísmico se usó el catálogo técnico de Dynamic Isolation Systems (DIS), Seismic Isolation for Buildings and Bridges, el cual presenta las propiedades mecánicas, capacidades de desplazamiento y rangos de carga vertical de los dispositivos disponibles comercialmente. Con base en los parámetros obtenidos en el prediseño lineal (rigidez efectiva, desplazamiento de diseño DM y carga vertical por aislador), se seleccionó el dispositivo tipo LRB (Lead Rubber Bearing) que mejor satisface las demandas del sistema, verificando que sus propiedades nominales, límite superior e inferior sean consistentes con los factores de modificación (λ) establecidos en el ASCE 7-16, Capítulo 17, para el análisis de tiempo historia no lineal, ingreso al catálogo con la carga axial y el desplazamiento

Figura 26

Cargas máximas a compresión



El valor máximo a compresión es de 683.6577 ton f (6,700.1 kN)

Tabla 28

Selección del tipo de aislador

Isolator Diameter, D _I (mm)	DESIGN PROPERTIES			Maximum Displacement, D _{max} (mm)	Axial Load Capacity P _{max} (kN)
	Yielded Stiffness, K _d (kN/mm)	Characteristic Strength Q _d (kN)	Compression Stiffness, K _v (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000

Nota: Adaptado del catálogo DIS

Se seleccionó un aislador sísmico de diámetro $D_1 = 950$ mm de la serie Dynamic Isolation Systems (DIS), con las siguientes propiedades de diseño: rigidez post-fluencia $K_d = 0.7\text{--}6.1$ kN/mm, resistencia característica $Q_d = 0\text{--}490$ kN, rigidez a compresión $K_v > 1,800$ kN/mm, desplazamiento máximo $D_{\max} = 610$ mm y capacidad de carga axial $P_{\max} = 6,700$ kN. El cual cumple satisfactoriamente con los requerimientos de desplazamiento y capacidad de carga axial obtenidos del análisis estructural, verificando que la carga axial máxima actuante sobre los apoyos de la estructura no supera la capacidad admisible del aislador elegido.

Figura 27

Diagrama de flujo de la metodología de análisis estructural

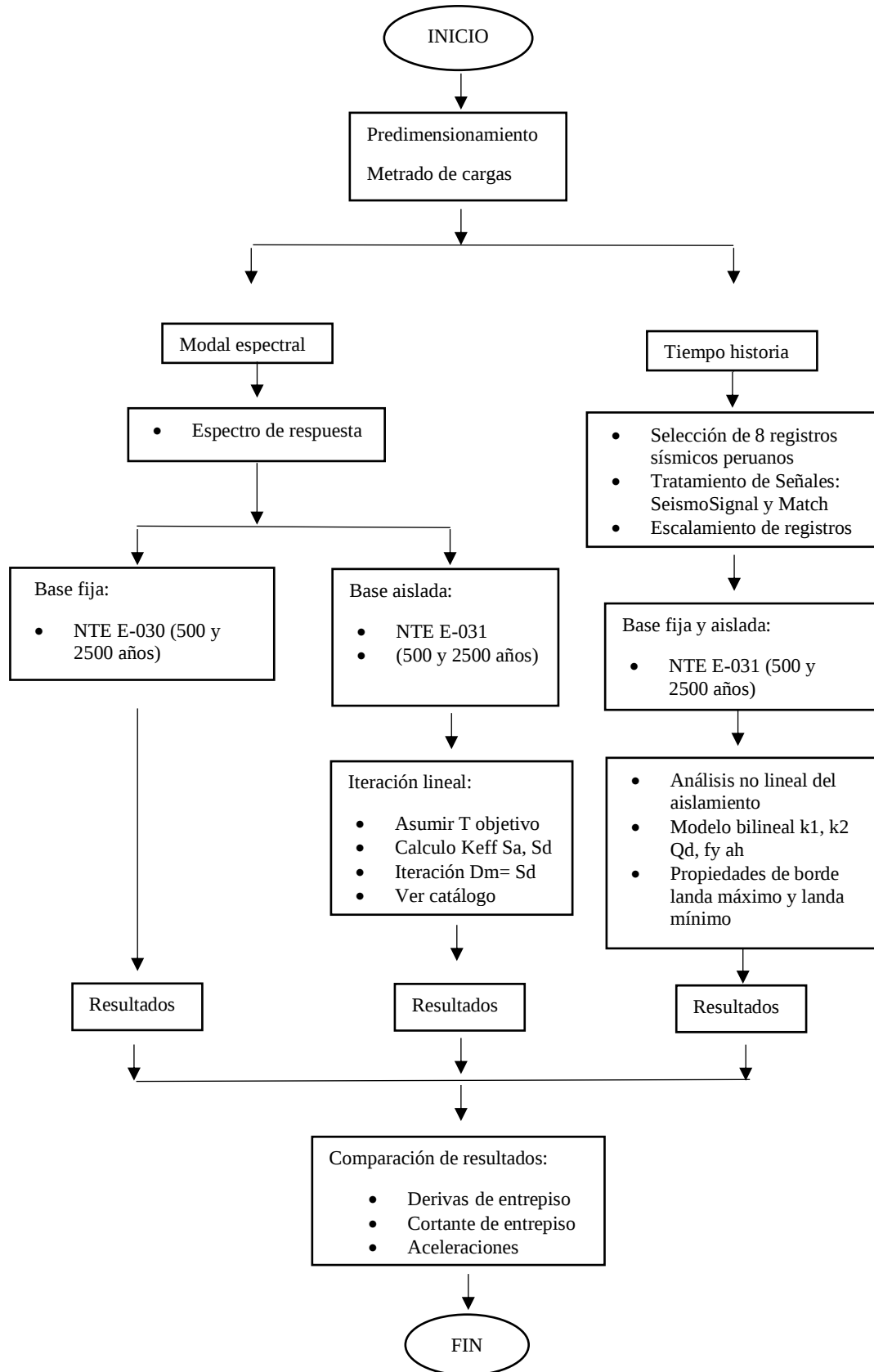


Figura 28

Diagrama de flujo para el diseño del sistema de aislamiento sísmico

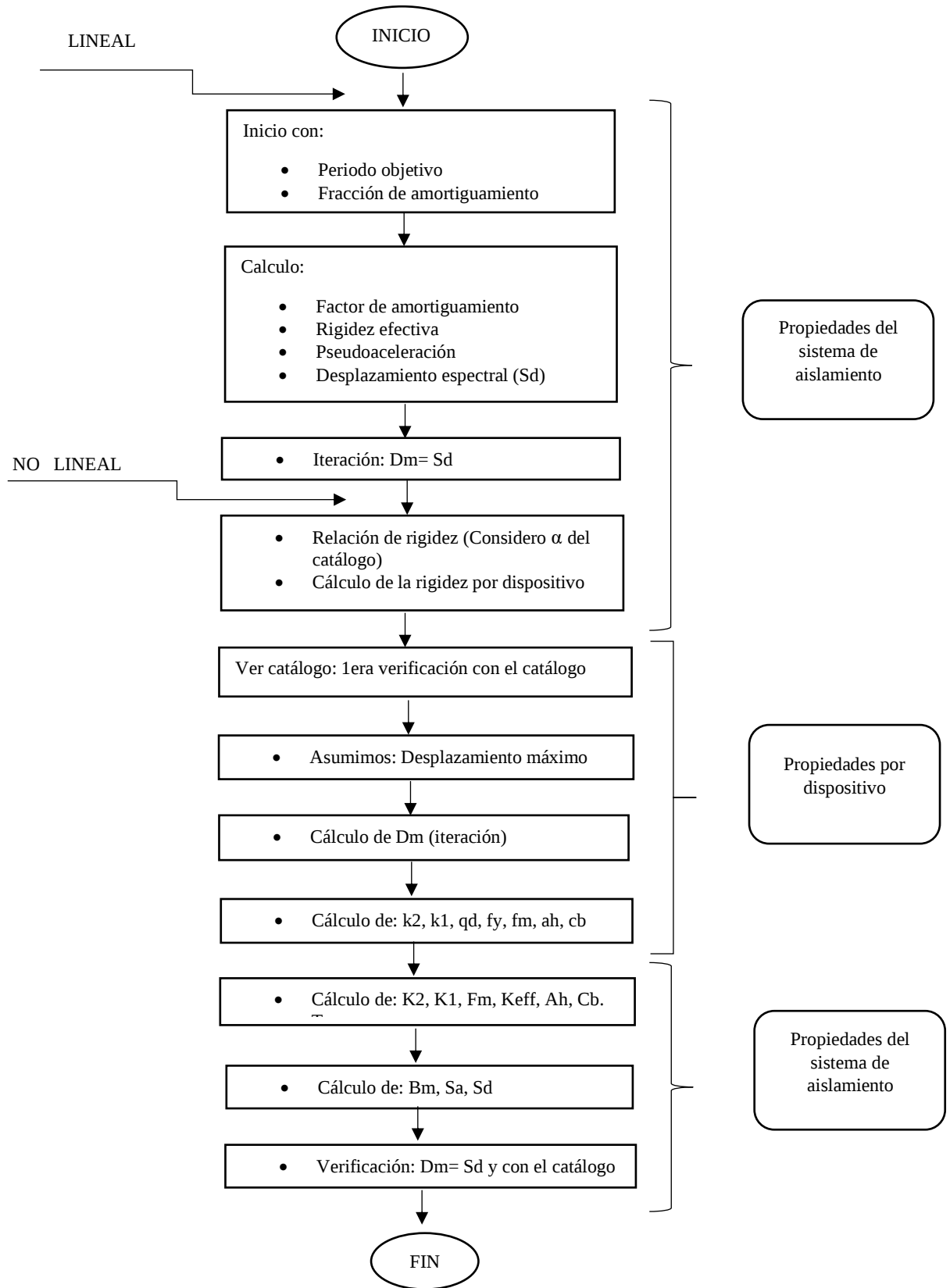
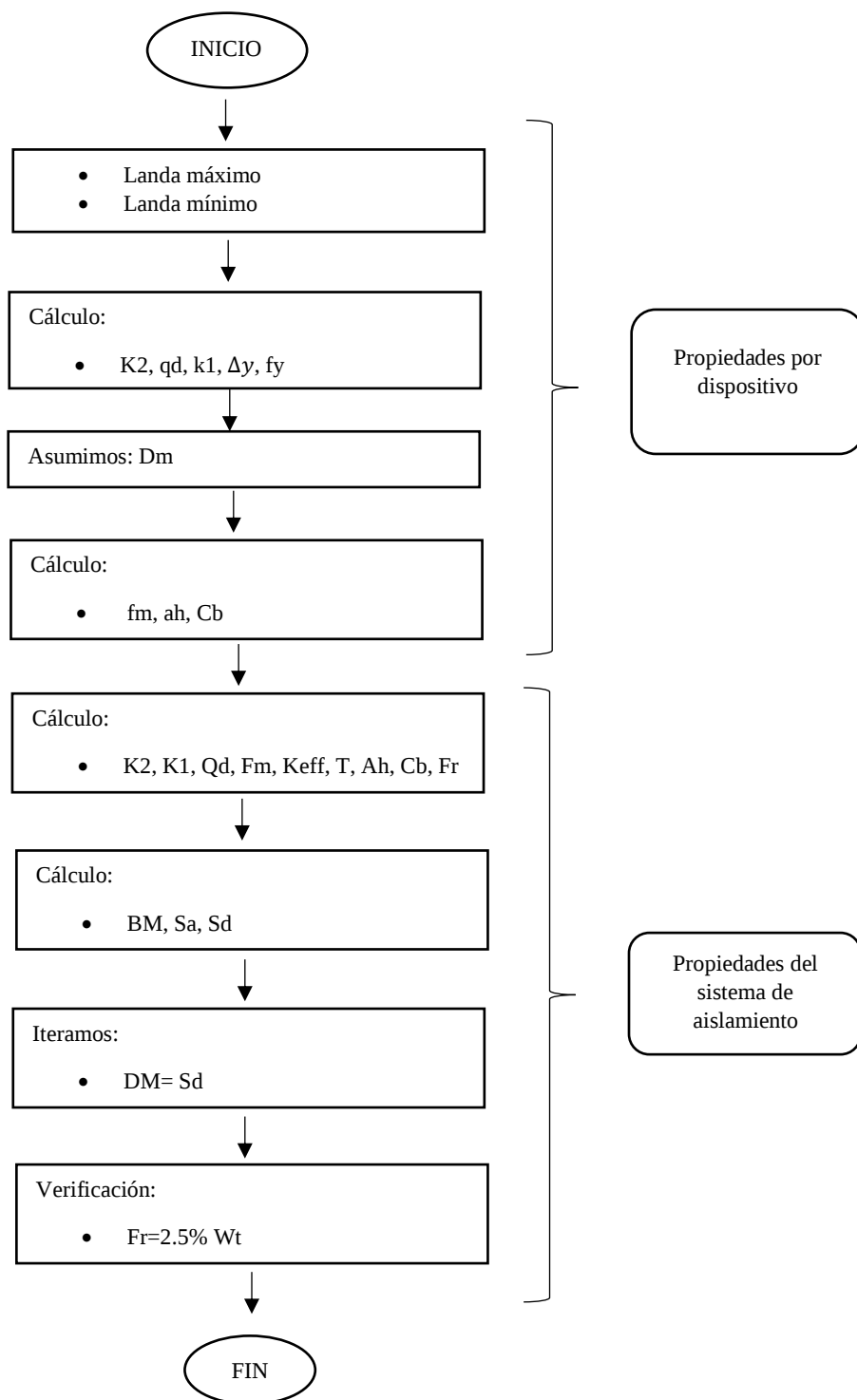


Figura 29

Diagrama de flujo para landa máximo y landa mínimo



3.5. Verificación de resultados

3.5.1. Verificación de irregularidades

3.5.1.1 Análisis Modal espectral base fija

3.5.1.1.1 Irregularidad Torsional

Tabla 29

Irregularidad Torsional

Nivel	Estructura	Rango	Condición
AZOT	1.257	1.3	Regular
TECHO 3	1.256	1.3	Regular
TECHO 2	1.256	1.3	Regular
TECHO 1	1.255	1.3	Regular

No presenta irregularidad torsional pues los valores no superan el 30 % que menciona la norma E 030

3.5.1.1.2 Irregularidad de Masa

Tabla 30

Irregularidad de Masa

Nivel	Altura	Masa	Im >1.5	Condición	Im >1.5	Condición
TECHO 3	12	525.5				
TECHO 2	8	532.9	1.0	Regular	0.99	Regular
TECHO 1	4	533.0	1.0	Regular	1.00	Regular

No presenta irregularidad de masa, pues no excede del 50 % del piso adyacente como menciona la norma

3.5.1.1.3 Irregularidad de rigidez

Tabla 31

Irregularidad de Rigidez

Nivel	Altura	Y-Dir (tonf/m)	Ix <0.70	Condición	Ix <0.80	Condición
AZOT	16	365644.9				
TECHO 3	12	685069.0	1.87	Regular		
TECHO 2	8	971194.9	1.42	Regular		
TECHO 1	4	1784736.5	1.84	Regular	2.65	Regular

No presenta irregularidad de rigidez, pues la división en los pisos adyacentes es mayor del 70 % y la división del primer nivel con el promedio de los 3 pisos consecutivos es mayor al 80 % como indica la norma E 030

3.5.1.1.4 Irregularidad geométrica

Tabla 32

Irregularidad Geométrica

Nivel	AREA UTIL	lg >1.30	Condición
AZOT	3375		
TECHO 3	3600	1.07	Regular
TECHO 2	3600	1.00	Regular
TECHO 1	3600	1.00	Regular

No presenta irregularidad geométrica pues la relación del área geométrica vertical no es mayor al 30 %.

3.5.1.1.5 Discontinuidad en los Sistemas Resistentes:

Conforme a la norma E.030 (2019), esta irregularidad se configura cuando un elemento que resiste más del 10% de la fuerza cortante del piso presenta un desalineamiento vertical (cambio de orientación o desplazamiento del eje) mayor al 25% de su dimensión en planta. Sin embargo, esta estructura no presenta dicha irregularidad, pues de acuerdo a la configuración estructural los elementos verticales están alineados verticalmente, sin ninguna reducción o cambio de ubicación.

3.5.1.1.6 Esquinas Entrantes:

Según la norma E.030 (2019), esta irregularidad existe cuando las dimensiones de las proyecciones entrantes (entrantes en planta) en ambas direcciones son mayores al 20% de la dimensión total correspondiente de la planta del edificio. Sin embargo, esta estructura no presenta dicha irregularidad pues es un rectángulo perfecto.

3.5.1.1.7 Discontinuidad del Diafragma:

La norma E.030 (2019) establece esta irregularidad cuando existen aberturas en el diafragma cuya área supera el 50% del área bruta del mismo, o cuando se presentan variaciones significativas en la rigidez efectiva del diafragma, con cambios mayores al 50% entre zonas adyacentes. Sin embargo, esta estructura no presenta dicha irregularidad.

3.5.1.1.8 Sistemas no Paralelos:

Conforme a la norma E.030 (2019), esta irregularidad ocurre cuando los elementos resistentes verticales no son paralelos ni simétricos con respecto a los ejes ortogonales principales del sistema sismorresistente, presentando desviaciones angulares mayores a 30°, y además resisten más del 10% de la fuerza cortante del piso. Sin embargo, esta estructura no presenta dicha irregularidad.

3.5.1.2 Análisis Modal espectral base aislada

3.5.1.2.1 Irregularidad Torsional

Tabla 33

Irregularidad Torsional

Nivel	Estructura	Rango	Condición
AZOT	1.049	1.3	Regular
TECHO 3	1.036	1.3	Regular
TECHO 2	1.045	1.3	Regular
TECHO 1	1.053	1.3	Regular

No presenta irregularidad torsional pues los valores no superan el 30 % que menciona la norma E 030

3.5.1.2.2 Irregularidad de Masa

Tabla 34

Irregularidad de Masa

Nivel	Altura	Masa	Im >1.5	Condición	Im >1.5	Condición
TECHO 3	12	525.5				
TECHO 2	8	532.9	1.0	Regular	0.99	Regular
TECHO 1	8	533.0	1.0	Regular	1.00	Regular
AISL	4	635.9	1.2	Regular	0.84	Regular

No presenta irregularidad de masa, pues no excede del 50 % del piso adyacente como menciona la norma

3.5.1.2.3 Irregularidad de rigidez

Tabla 35

Irregularidad de Rigidez

Nivel	Altura	Y-Dir (tonf/m)	Ix <0.70	Condición	Ix <0.80	Condición
AZOT	16	89326.4				
TECHO 3	12	127840.8	1.43	Regular		
TECHO 2	8	144635.7	1.13	Regular		
TECHO 1	8	226860.1	1.57	Regular	1.88	Regular

No presenta irregularidad de rigidez, pues la división en los pisos adyacentes no es menor del 70 % y la división del primer nivel con el promedio de los 3 pisos consecutivos no es menor al 80 % como indica la norma E 030

3.5.1.2.4 Irregularidad geométrica

Tabla 36

Irregularidad Geométrica

Nivel	AREA UTIL	Ig >1.30	Condición
AZOT	3375		
TECHO 3	3600	1.07	Regular
TECHO 2	3600	1.00	Regular
TECHO 1	3600	1.00	Regular

No presenta irregularidad geométrica pues la relación del área geométrica vertical no es mayor al 30 %.

3.5.1.3 Análisis Tiempo historia en base fija y aislada

3.5.1.3.1 Irregularidad Torsional

Tabla 37

Irregularidad Torsional

Nivel	Estructura	Rango	Condición
AZOT	1.049	1.3	Regular
TECHO 3	1.036	1.3	Regular
TECHO 2	1.045	1.3	Regular
TECHO 1	1.053	1.3	Regular

No presenta irregularidad torsional pues los valores no superan el 30 % que menciona la norma E 030

3.5.1.3.2 Irregularidad de Masa

Tabla 38

Irregularidad de Masa

Nivel	Altura	Masa	Im >1.5	Condición	Im >1.5	Condición
TECHO 3	12	525.5				
TECHO 2	8	532.9	1.0	Regular	0.99	Regular
TECHO 1	8	533.0	1.0	Regular	1.00	Regular
AISL	4	635.9	1.2	Regular	0.84	Regular

No presenta irregularidad de masa, pues no excede del 50 % del piso adyacente como menciona la norma

3.5.1.3.3 Irregularidad de rigidez

Tabla 39

Irregularidad de Rigidez

Nivel	Altura	Y-Dir (tonf/m)	Ix <0.70	Condición	Ix <0.80	Condición
AZOT	16	89326.4				
TECHO 3	12	127840.8	1.43	Regular		
TECHO 2	8	144635.7	1.13	Regular		
TECHO 1	8	226860.1	1.57	Regular	1.88	Regular

No presenta irregularidad de rigidez, pues la división en los pisos adyacentes no es menor del 70 % y la división del primer nivel con el promedio de los 3 pisos consecutivos no es menor al 80 % como indica la norma E 030

3.5.1.3.4 Irregularidad geométrica

Tabla 40

Irregularidad Geométrica

Nivel	AREA UTIL	Ig >1.30	Condición
AZOT	3375		
TECHO 3	3600	1.07	Regular
TECHO 2	3600	1.00	Regular
TECHO 1	3600	1.00	Regular

No presenta irregularidad geométrica pues la relación del área geométrica vertical no es mayor al 30 %.

3.5.2. Verificación Del Sistema De Aislación

3.5.3.1 Verificación de tracción en los dispositivos

Debido a que los dispositivos de aislamiento presentan una resistencia limitada ante esfuerzos verticales, es fundamental verificar que las tracciones generadas durante un evento sísmico se mantengan dentro de rangos permisibles. De acuerdo con los lineamientos de la Norma E.031, la carga vertical mínima se determina mediante la combinación de carga muerta, carga sísmica horizontal y carga sísmica vertical.

$$1,25 (CM + CV) + 1,0 (CSH + CSV) \quad \text{..... (55)}$$

Cálculo de la carga vertical

$$CSV = 0.5 \times (1.5 \times Z \times S) \times CM \quad \text{..... (56)}$$

$$CSV = 0.5 \times (1.5 \times 0.35 \times 1.15) \times CM$$

$$CSV = 0.301875XCM$$

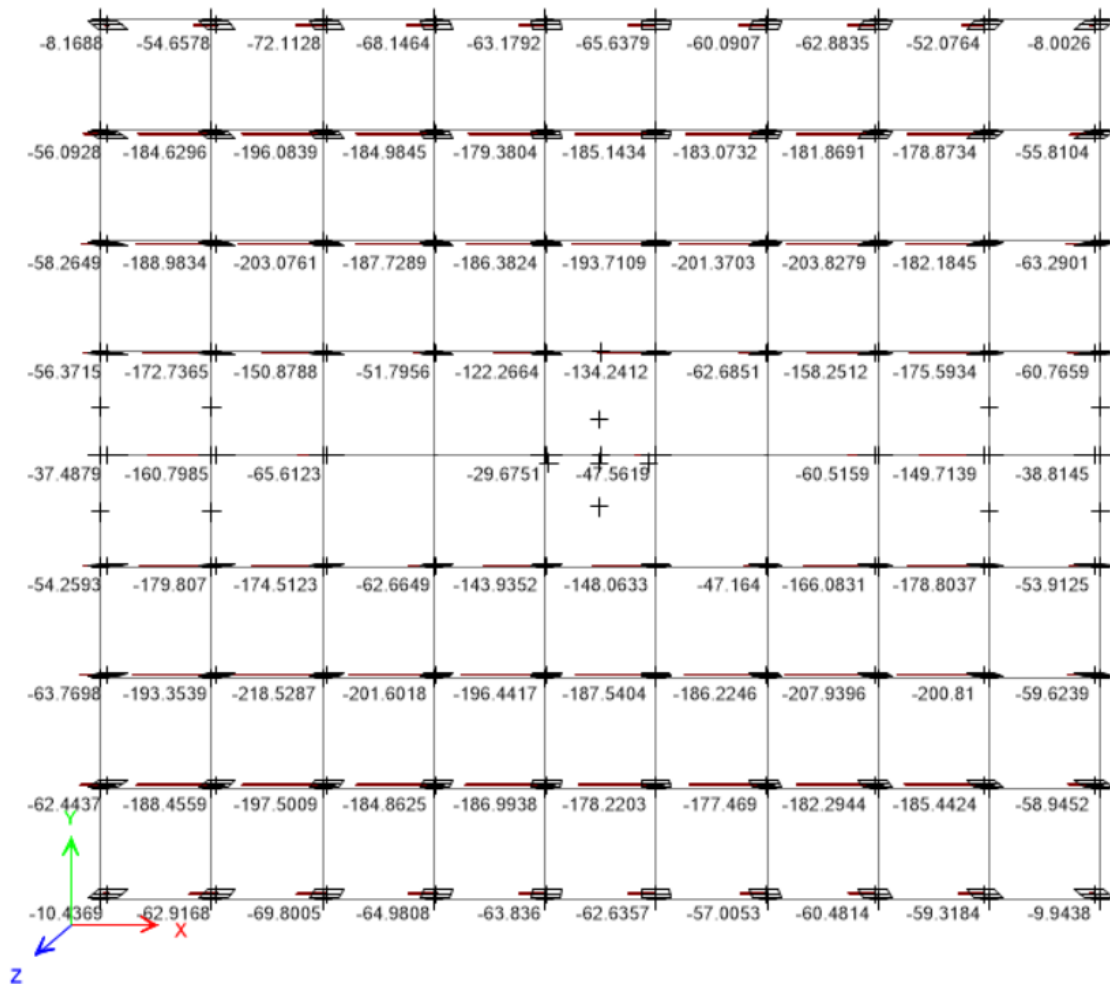
Fórmula para tracción:

Carga vertical Mínima (Pmin)

$$Pmin = 0.9CM - (CSH + CSV) \quad \text{..... (57)}$$

Figura 30

Fuerzas máximas a tracción



Los resultados obtenidos del análisis estructural indican que todos los dispositivos de apoyo trabajan exclusivamente a compresión (valor máximo de -8.16 tonf), lo cual confirma la ausencia total de tracciones en el sistema. La ausencia de tracciones ayuda a que no haya levantamiento de los apoyos, dando una buena estabilidad de la estructura. Validando que el sistema trabaja correctamente dentro de los rangos admisibles.

3.5.3.2 Verificación de la fuerza restitutiva

$Fr > 2.5 \%$ peso

Peso sísmico, W (tonf)= 25894.61

Fuerza restitutiva, Fr (tonf)= 837.39

$$Fr/W = 3.23\%$$

Cumple pues es mayor que el 2.5%

3.5.3. Junta sísmica

El desplazamiento máximo es de 38.73 haciendo uso de la norma numeral 20.3, artículo 20, norma E.031, como se puede ver a continuación:

Tabla 41

Desplazamiento total

Descripción	Valor
Período traslacional, T_M [s] ref: numeral 20.3, artículo 20 de la norma E.031. Obtenido por análisis dinámico.	3.95
Período rotacional, $T_{\theta M}$ [s] ref: numeral 20.3, artículo 20 de la norma E.031. Obtenido por análisis dinámico.	3.87
Razón entre período traslacional y rotacional efectivo, $\rho_T = T_M/T_{\theta M}$ Ref: numeral 20.3, artículo 20 de la norma E.031. Obtenido por análisis dinámico.	1.02
Relación entre desplazamiento total y traslacional en la dirección principal, $D_{TM}/D_M = 1 + 12 * y * e / [\rho_T^2 * (L_x^2 + L_y^2)] \geq 1.15$ Ref.: Ec. 8, artículo 20, norma E.031.	1.16
Desplazamiento total incluye la traslación y la torsión, D_{TM} [cm]	38.73
Desplazamiento total incluye la traslación y la torsión, D'_{TM} [cm]	37.78

Para determinar la junta sísmica se debe considerar las exigencias de la Norma E.030 y la Norma E.031, pues la junta busca prevenir el golpeteo mediante la suma de las respuestas máximas: el desplazamiento total máximo de la base aislada y la separación normativa del edificio convencional basada en su altura. Este cálculo asegura que, ante un Sismo Máximo Considerado, ambas estructuras oscilen libremente sin comprometer su integridad estructural ni la funcionalidad de los aisladores. Para un edificio de base aislada la NTE E.031 menciona que se tiene que considerar el mayor desplazamiento el cual es el Desplazamiento Total Máximo calculado 38.73, mientras que para un edificio de Base Fija la NTE E. menciona que es en función de la altura (16m) para lo cual se hace uso de la siguiente formula $s = 0.006 * h = 0.006 * 1600 = 9.6 \text{ cm}$

3.6 Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados

3.6.1 Tratamiento y análisis de datos:

3.6.1.1 Cortante de entrepiso:

En la siguiente tabla se muestran las fuerzas cortantes de entrepiso en la dirección Y, la dirección más crítica, evaluadas por análisis modal espectral y tiempo-historia en diferentes tipos de sistema de aislamiento y diferentes periodos de retorno; los cuales permiten comparar el comportamiento estructural.

Tabla 42

Cortante de entrepiso

Nivel	Espectral (Base Fija- 500 años)	Espectral (Base Aislada-500 años)	Espectral (Base Fija - 2500 años)	Espectral (Base Aislada-2500 años)	Tiempo Historial (Base Fija- 2500 años)	Tiempo Historial (Base Aislada-2500 años)
	tonf	tonf	tonf	tonf	tonf	tonf
AZOTEA	2845.3	320.0	4261.3	486.3	6710.3	808.4
TECHO 3	6173.9	808.6	9262.2	1255.9	14691.1	1692.4
TECHO 2	8463.0	1215.0	12705.3	1932.8	19872.8	2035.7
TECHO 1	9622.5	1575.1	14444.4	2552.6	22426.6	2234.8

3.6.1.2 Cortante en la base:

En la siguiente tabla se muestran las fuerzas cortantes en la base en la dirección Y, la dirección más crítica, evaluadas por análisis modal espectral y tiempo-historia en diferentes tipos de sistema de aislamiento y diferentes periodos de retorno; evidenciando el efecto del aislamiento en la disminución de la demanda sísmica.

Tabla 43

Cortante en la base

Nivel	Espectral (Base Fija- 500 años)	Espectral (Base Aislada-500 años)	Espectral (Base Fija - 2500 años)	Espectral (Base Aislada-2500 años)	Tiempo Historial (Base Fija- 2500 años)	Tiempo Historial (Base Aislada-2500 años)
Base	9622.5	2031.3	14460.0	3314.0	22426.6	2556.7

3.6.1.3 Derivas de entre piso:

En la siguiente tabla se muestran las derivas de entrepiso en la dirección Y, la dirección más crítica, evaluadas por análisis modal espectral y tiempo-historia en diferentes tipos de sistema de aislamiento y diferentes periodos de retorno; Los valores

se comparan con los límites permisibles establecidos por la normativa, permitiendo evaluar el desempeño sísmico, teniendo en cuenta que para la base fija es una deriva inelástica, la cual incursiona en daño.

Tabla 44

Derivas de entrepiso

Nivel	Espectral (Base Fija- 500 años)	Espectral (Base Aislada-500 años)	Espectral (Base Fija - 2500 años)	Espectral (Base Aislada-2500 años)	Tiempo Historial (Base Fija- 2500 años)	Tiempo Historial (Base Aislada-2500 años)
AZOTEA	0.0089	0.0010	0.0134	0.0015	0.0372	0.0023
TECHO 3	0.0149	0.0017	0.0227	0.0026	0.0457	0.0035
TECHO 2	0.0182	0.0022	0.0276	0.0035	0.0463	0.0039
TECHO 1	0.0115	0.0017	0.0175	0.0029	0.0315	0.0028

Figura 31

Límite de 7‰ en deriva de entrepiso

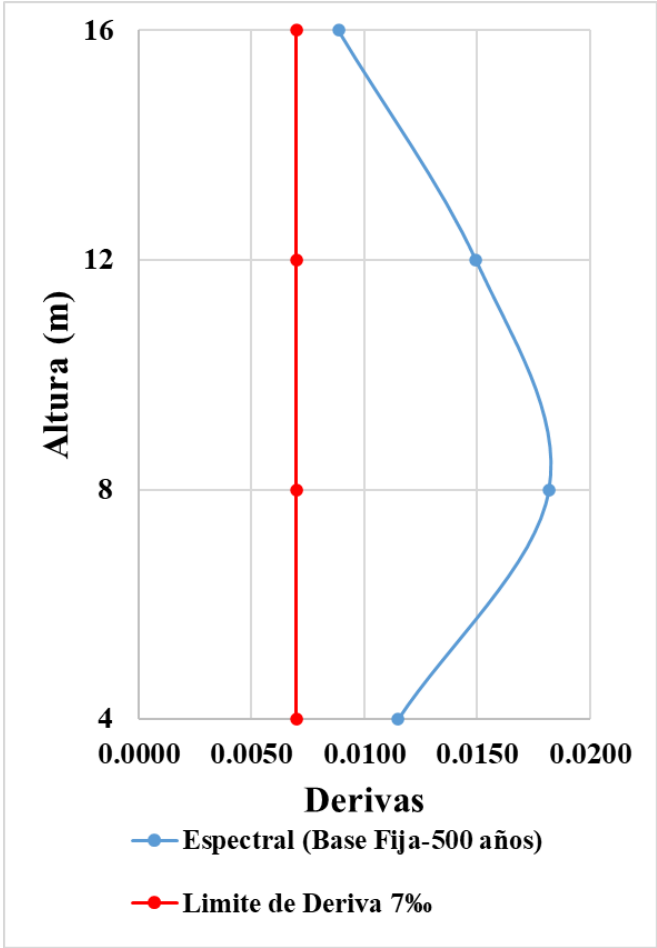


Figura 32

Límite de 3.5‰ en deriva de entrepiso

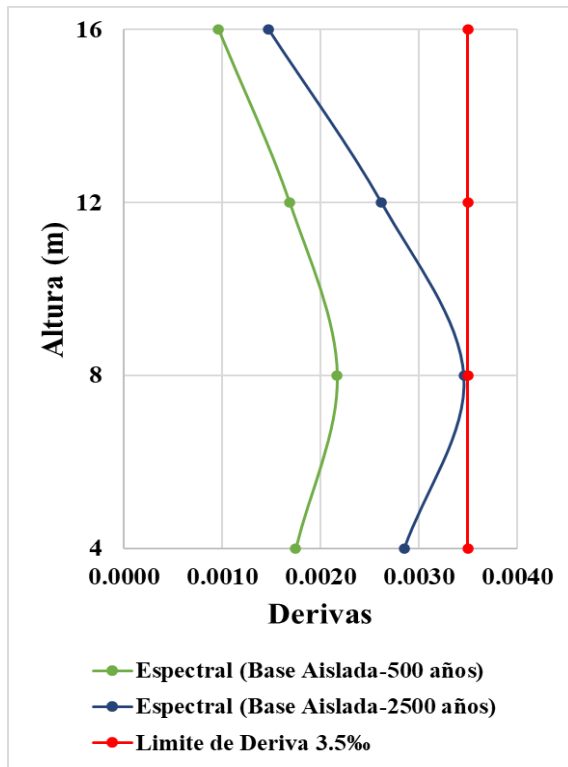
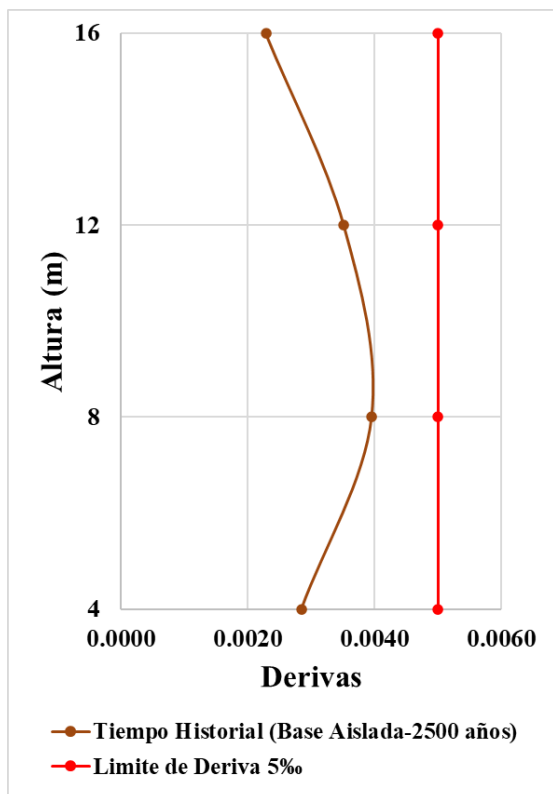


Figura 33

Límite de 5‰ en deriva de entrepiso



3.6.1.4 Aceleración:

En la siguiente tabla se muestran las aceleraciones en la dirección Y, la dirección más crítica, evaluadas por análisis modal espectral y tiempo-historia en diferentes tipos de sistema de aislamiento y diferentes periodos de retorno.

Tabla 45

Aceleraciones

Nivel	Espectral (Base Fija- 500 años)	Espectral (Base Aislada-500 años)	Espectral (Base Fija - 2500 años)	Espectral (Base Aislada-2500 años)	Tiempo Historial (Base Fija- 2500 años)	Tiempo Historial (Base Aislada-2500 años)
AZOT	1.27	0.12	1.92	0.19	2.63	0.33
TECHO 3	0.94	0.11	1.41	0.18	1.88	0.20
TECHO 2	0.79	0.10	1.18	0.17	1.44	0.14
TECHO 1	0.56	0.10	0.84	0.16	0.96	0.17

3.6.2 Presentación de resultados

3.6.2.1 Análisis de derivas de entrepiso

Las derivas de entrepiso constituyen un indicador fundamental de daño en el comportamiento estructural, ya que miden la deformación relativa entre pisos adyacentes en función de la altura de entrepiso. El análisis comparativo entre la edificación con base fija y aquella con aislamiento sísmico revela reducciones consistentes y significativas en todos los niveles y escenarios de amenaza sísmica evaluados.

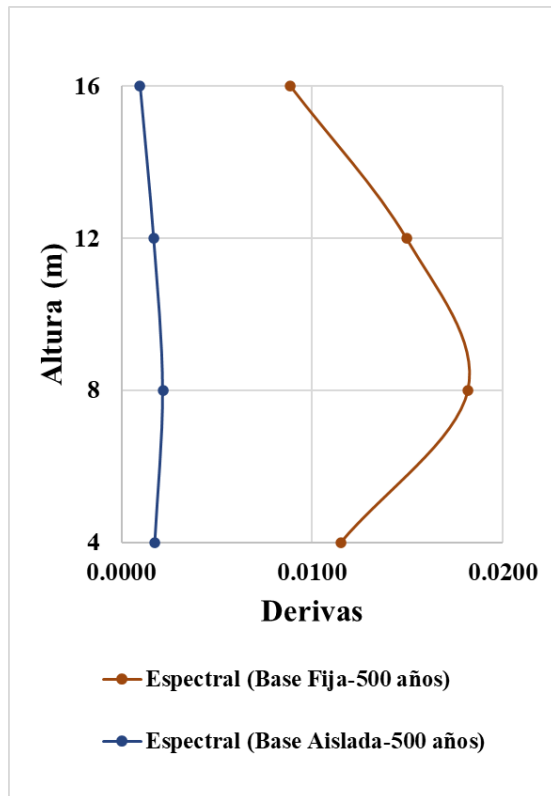
3.6.2.1.1 Modal Espectral 500 años — Base Fija vs. Base Aislada

Para el sismo de diseño de 500 años de periodo de retorno, la base fija registra derivas que oscilan entre 0.0089 (AZOTEA) y 0.0182 (TECHO 2), superando el límite normativo en los niveles intermedios. Con aislamiento sísmico, las derivas se reducen drásticamente: el AZOTEA baja a 0.0010 (reducción del 88.76%), el TECHO 3 a 0.0017 (88.59%), el TECHO 2 a 0.0022 (87.91%) y el AZOTEA a 0.0017 (85.22%). Esta reducción masiva confirma que el desacoplamiento dinámico mantiene la superestructura casi en reposo respecto al movimiento del suelo bajo demanda sísmica.

Tabla 46

Comparación de Derivas: Modal Espectral 500 años

Nivel	Espectral (Base Fija-500 años)	Espectral (Base Aislada-500 años)	% Reducción
AZOTEA	0.0089	0.0010	88.76%
TECHO 3	0.0149	0.0017	88.59%
TECHO 2	0.0182	0.0022	87.91%
TECHO 1	0.0115	0.0017	85.22%

Figura 34*Comparación de Derivas: Modal Espectral 500 años***3.6.2.1.2 Modal Espectral 2500 años — Base Fija vs. Base Aislada**

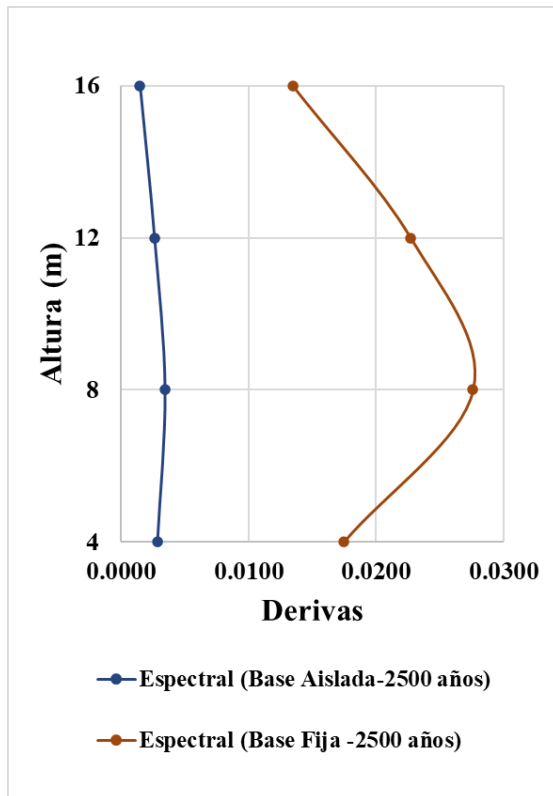
Ante el Sismo Máximo Considerado (MCE, 2500 años), la base fija muestra derivas críticas de hasta 0.0276 en el TECHO 3, valor que implica daño severo o colapso en marcos convencionales. El aislamiento sísmico reduce este valor a 0.0035 (reducción del 87.32%). En el AZOTEA, la deriva cae de 0.0134 a 0.0015 (88.81%). A pesar de que la demanda sísmica es aproximadamente cinco veces mayor que la del sismo de 500 años, las derivas bajo aislamiento se mantienen en niveles asociados a comportamiento elástico o daño leve, evidenciando la capacidad del sistema para gestionar sismos extraordinarios.

Tabla 47*Comparación de Derivas: Modal Espectral 2500 años*

Nivel	Espectral (Base Fija - 2500 años)	Espectral (Base Aislada-2500 años)	% Reducción
AZOTEA	0.0134	0.0015	88.81%
TECHO 3	0.0227	0.0026	88.55%
TECHO 2	0.0276	0.0035	87.32%
TECHO 1	0.0175	0.0029	83.43%

Figura 35

Comparación de Derivas: Modal Espectral 2500 años

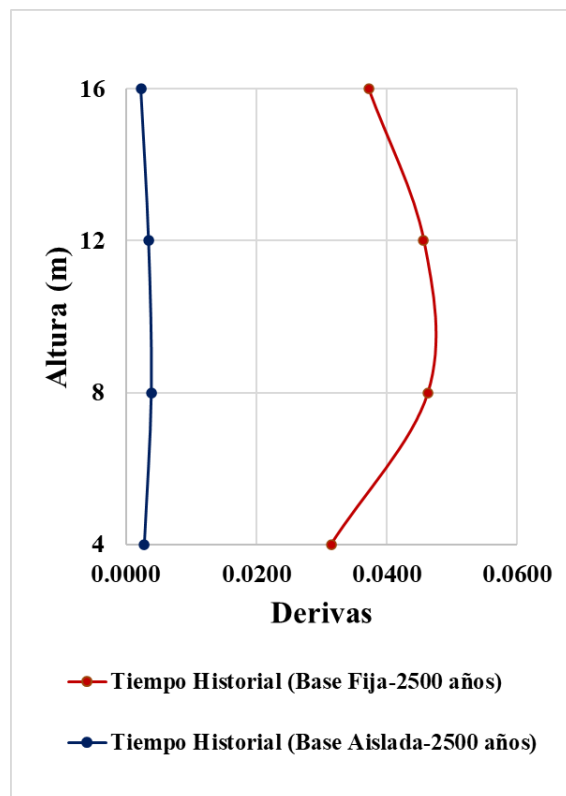


3.6.2.1.3 Tiempo Historia 2500 años — Base Fija vs. Base Aislada

El análisis Tiempo Historia bajo sismos reales escalados al MCE arroja resultados notablemente distintos entre base fija y base aislada. La base fija registra derivas entre 0.0315 y 0.0463, mientras que la base aislada las reduce entre 0.0023 y 0.0039, logrando reducciones de 91.11% a 93.82%. Estas reducciones son incluso superiores a las obtenidas en el análisis espectral, lo que refleja que ante registros sísmicos reales la demanda sobre la base fija es significativamente mayor, mientras el sistema aislado mantiene la superestructura en niveles de deformación muy controlados. En todos los casos, las derivas bajo aislamiento se mantienen inferiores a las de la base fija, confirmando el beneficio consistente del sistema de aislamiento incluso ante sismos extraordinarios.

Tabla 48*Comparación de Derivas: Tiempo Historia 2500 años*

Nivel	Tiempo Historial (Base Fija-2500 años)	Tiempo Historial (Base Aislada-2500 años)	% Reducción
AZOTEA	0.0370	0.0023	93.78%
TECHO 3	0.0457	0.0035	92.34%
TECHO 2	0.0463	0.0039	91.58%
TECHO 1	0.0315	0.0028	91.11%

Figura 36*Comparación de Derivas: Tiempo Historia 2500 años*

3.6.2.2 Análisis de cortante de la superestructura

La cortante de entrepiso la línea base (Modal Espectral, Base Fija, 500 años) presenta un máximo de 9,622.5 tonf en el TECHO 1. Los tres modelos con aislamiento sísmico evidencian reducciones significativas sustentadas en el desacoplamiento dinámico entre el terreno y la superestructura. El modelo Modal Espectral (Base Aislada, 500 años) reduce la cortante en TECHO 1 a 1,575.1 tonf, una disminución del 83.64%. Ante el Sismo Máximo Considerado (MCE, 2,500 años), el modelo Modal Espectral registra 2,552.6 tonf en TECHO 1, manteniéndose un 73.48% por debajo de la línea base

a pesar de que la demanda sísmica es cinco veces mayor. El análisis Tiempo Historia (Base Aislada, 2,500 años) reporta 2,234.8 tonf en TECHO 1, equivalente a una reducción del 76.78%; al capturar el amortiguamiento no lineal real de los dispositivos de aislamiento bajo registros sísmicos específicos, produce demandas menores que el enfoque espectral para el mismo nivel de amenaza, confirmando que el sistema aislado mantiene fuerzas de entrepiso inferiores a las del diseño convencional incluso ante sismos extraordinarios.

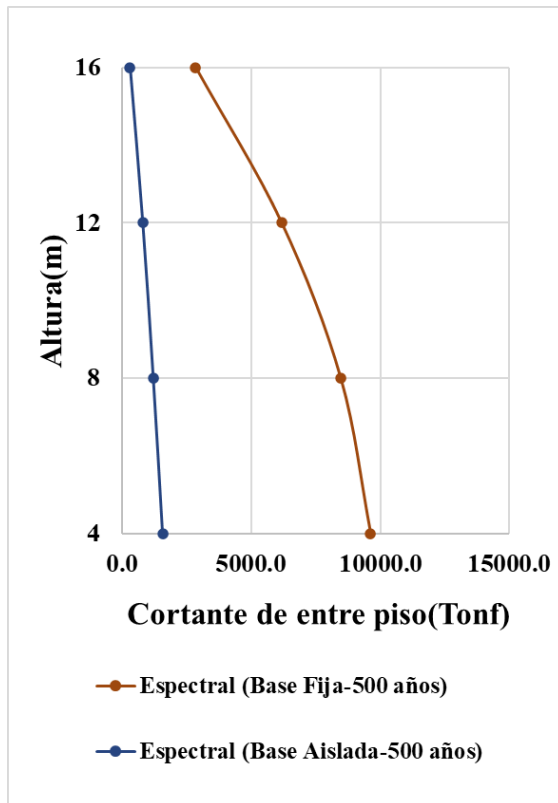
3.6.2.2.1 Modal Espectral 500 años — Base Fija vs. Base Aislada

Para el sismo de diseño de 500 años, las cortantes de la base fija alcanzan 9,622.5 tonf en TECHO 1 y 2,845.3 tonf en AZOTEA. El aislamiento sísmico produce reducciones superiores al 83% en todos los niveles: AZOTEA pasa de 2,845.3 a 320.0 tonf (reducción del 88.76%), mientras que TECHO 1 baja de 9,622.5 a 1,575.1 tonf (83.64%). Estas reducciones demuestran la eficacia del sistema para el sismo de diseño ordinario.

Tabla 49

Comparación de Cortante Superestructura: Modal Espectral 500 años

Nivel	Espectral (Base Fija-500 años)	Espectral (Base Aislada-500 años)	% Reducción
	tonf	tonf	
AZOTEA	2845.3	320.0	88.75%
TECHO 3	6173.9	808.6	86.90%
TECHO 2	8463.0	1215.0	85.64%
TECHO 1	9622.5	1575.1	83.63%

Figura 37*Comparación de Cortante Superestructura: Modal Espectral 500 años***3.6.2.2.2 Modal Espectral 2500 años — Base Fija vs. Base Aislada**

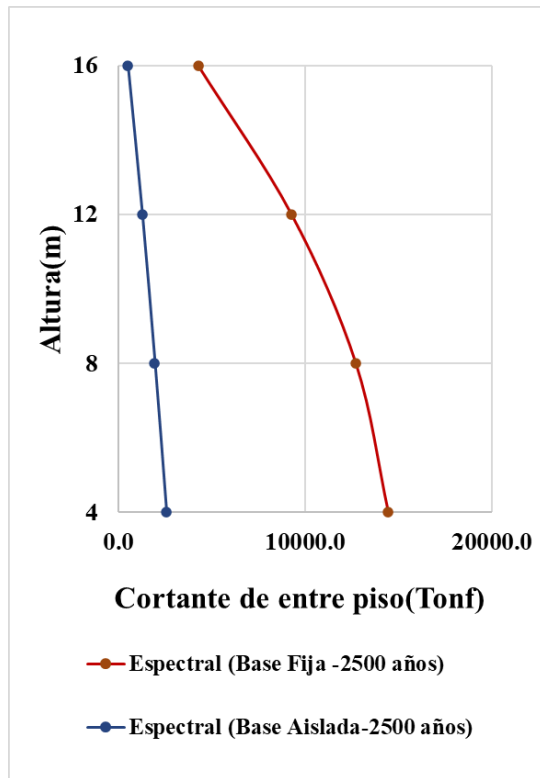
Bajo el MCE (2,500 años), la base fija registra cortantes de hasta 14,444.4 tonf en TECHO 1. Con aislamiento sísmico, este valor se reduce a 2,552.6 tonf (reducción del 82.33%). En AZOT, la cortante cae de 4,261.3 tonf a 486.3 tonf (reducción del 88.59%). A pesar del notable incremento en la demanda sísmica respecto al sismo de 500 años, el aislamiento mantiene las cortantes en valores controlables.

Tabla 50*Comparación de Cortante Superestructura: Modal Espectral 2500 años*

Nivel	Espectral (Base Fija - 2500 años)	Espectral (Base Aislada-2500 años)	% Reducción
	tonf	tonf	
AZOTEA	4261.3	486.3	88.59%
TECHO 3	9262.2	1255.9	86.44%
TECHO 2	12705.3	1932.8	84.79%
TECHO 1	14444.4	2552.6	82.33%

Figura 38

Comparación de Cortante Superestructura: Modal Espectral 2500 años



3.6.2.2.3 Tiempo Historia 2500 años — Base Fija vs. Base Aislada

El análisis Tiempo Historia bajo el MCE muestra la cortante de la base fija alcanzando valores de hasta 22,426.6 tonf en TECHO 1. Con aislamiento sísmico, TECHO 1 se reduce a 2,234.8 tonf (reducción del 90.04%), y AZOT de 6,710.3 a 808.4 tonf (reducción del 87.95%). Este análisis, al incorporar el amortiguamiento no lineal real de los dispositivos, registra las mayores demandas absolutas en la base fija, pero también confirma que el aislamiento sísmico mantiene su efectividad incluso ante los escenarios más severos.

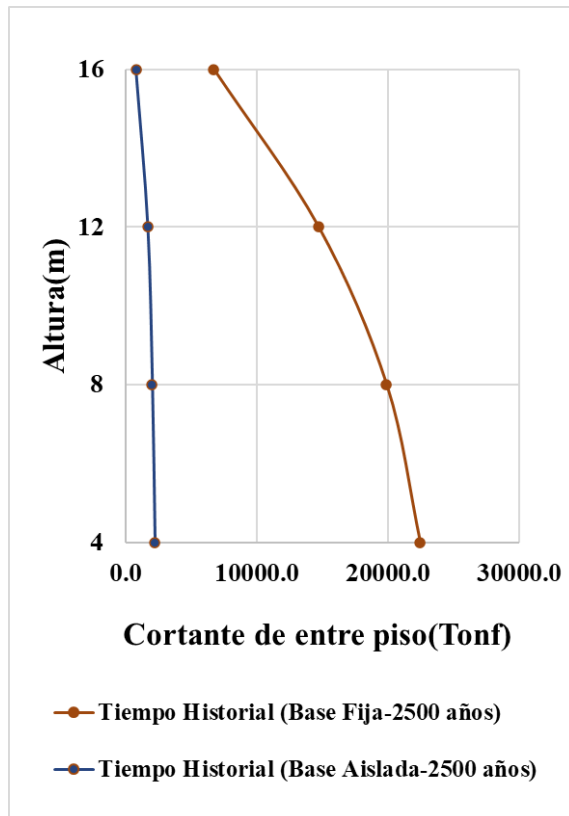
Tabla 51

Comparación de Cortante Superestructura: Tiempo Historia 2500 años

Nivel	Tiempo Historial (Base Fija-2500 años)	Tiempo Historial (Base Aislada-2500 años)	% Reducción
	tonf	tonf	
AZOTEA	6710.3	808.4	87.95%
TECHO 3	14691.1	1692.4	88.48%
TECHO 2	19872.8	2035.7	89.76%
TECHO 1	22426.6	2234.8	90.04%

Figura 39

Comparación de Cortante Superestructura: Tiempo Historia 2500 años



3.6.2.3 Análisis de cortante en la base

La cortante en la base representa la resultante total de las fuerzas sísmicas que debe transmitir la cimentación al suelo. El aislamiento sísmico reduce sustancialmente esta demanda en todos los escenarios de análisis, lo que se traduce en menores requerimientos de diseño para la subestructura y la cimentación.

Para el sismo de 500 años (Modal Espectral), la base fija registra 9,622.5 tonf, mientras que la base aislada reduce este valor a 2,031.3 tonf, una reducción del 78.89%. Ante el MCE (2,500 años, Modal Espectral), la cortante base fija asciende a 14,460.0 tonf, y la base aislada la reduce a 3,314.0 tonf (reducción del 77.08%). El análisis Tiempo Historia bajo el MCE presenta la mayor demanda en la base fija con 22,426.6 tonf, pero el aislamiento la controla a 2,556.7 tonf (reducción del 88.60%). La consistencia de las reducciones entre el 77% y el 89% para todos los escenarios confirma la robustez del sistema de aislamiento ante diferentes niveles de amenaza sísmica.

Tabla 52

Comparación de Cortante en la Base

Análisis	Base Fija (tonf)	Base Aislada (tonf)	% Reducción
Modal Espectral – 500 años	9622.5	2031.3	78.89%
Modal Espectral – 2500 años	14460	3314	77.08%
Tiempo Historia – 2500 años	22426.6	2556.7	88.60%

Figura 40

Comparación de Cortante en la base: Modal Espectral 500 años

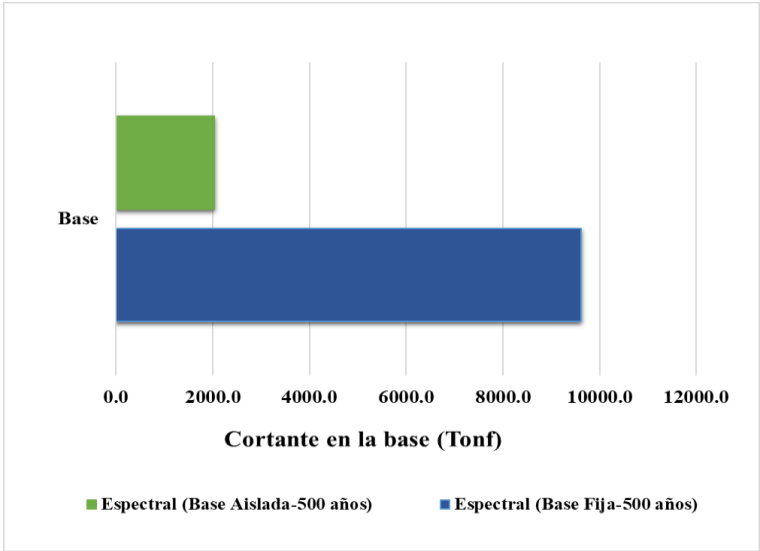


Figura 41

Comparación de Cortante en la base: Modal Espectral 500 años

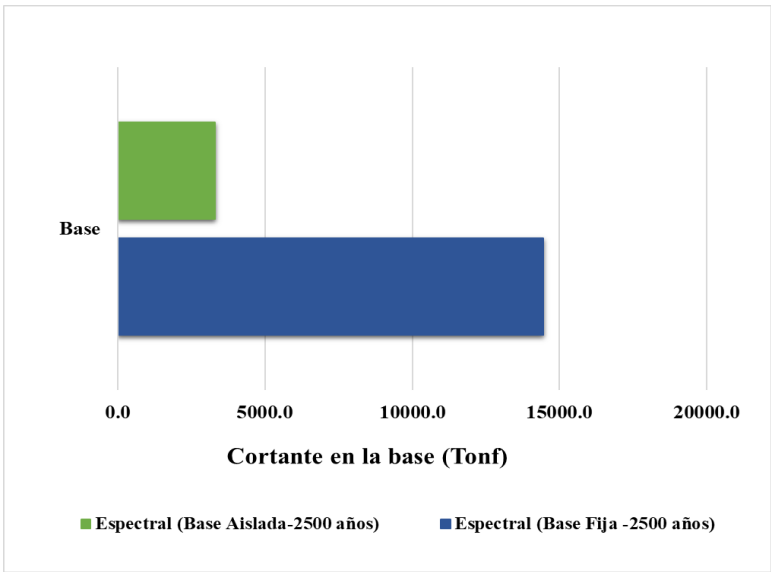
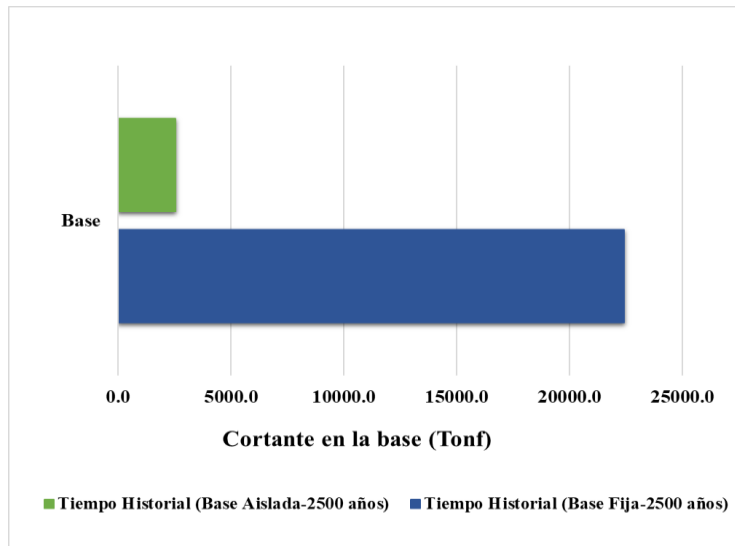


Figura 42

Comparación de Cortante en la base: Tiempo historial 2500 años



3.6.2.4 Análisis de aceleraciones de entrepiso

Las aceleraciones de entrepiso determinan las fuerzas de inercia sobre el contenido no estructural y los equipos de la edificación. Su reducción constituye uno de los principales beneficios del aislamiento sísmico para instalaciones hospitalarias, industriales o con equipos sensibles.

3.6.2.4.1 Modal Espectral 500 años — Base Fija vs. Base Aislada

Para el sismo de diseño de 500 años, la base fija registra aceleraciones de 1.27g en AZOTEA y 0.56g en TECHO 1, observándose la amplificación característica con la altura. El aislamiento sísmico reduce estas aceleraciones a valores entre 0.10g y 0.12g en todos los niveles (reducciones del 82.22% a 90.55%), prácticamente uniformizando la aceleración en la superestructura, lo que confirma el comportamiento casi de cuerpo rígido del edificio aislado.

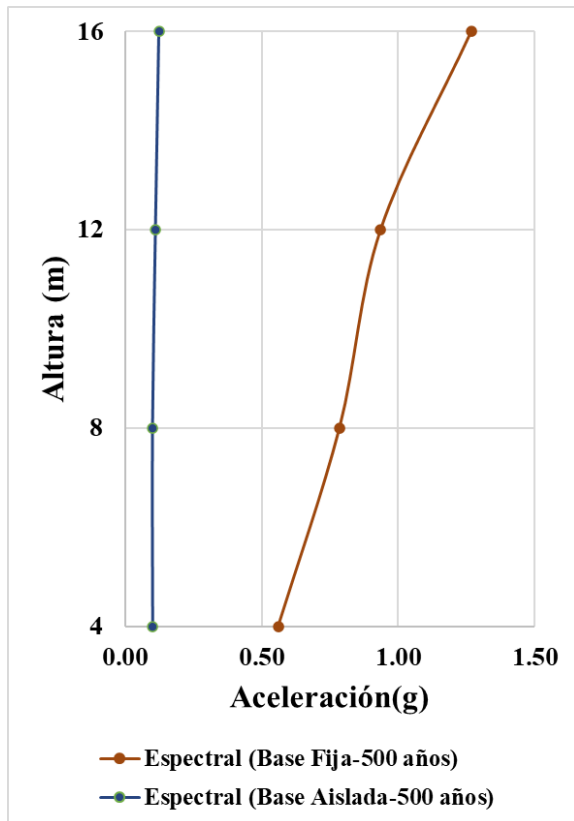
Tabla 53

Comparación de Aceleraciones de Entrepiso: Modal Espectral 500 años

Nivel	Espectral (Base Fija-500 años)	Espectral (Base Aislada-500 años)	% Reducción
AZOTEA	1.27	0.12	90.55%
TECHO 3	0.94	0.11	88.03%
TECHO 2	0.79	0.10	87.16%
TECHO 1	0.56	0.10	81.92%

Figura 43

Comparación de Aceleraciones de Entrepiso: Modal Espectral 500 años



3.6.2.4.2 Modal Espectral 2500 años — Base Fija vs. Base Aislada

Bajo el MCE (2,500 años), la base fija muestra aceleraciones de hasta 1.92g en AZOTEA. Con aislamiento sísmico, la aceleración máxima es de solo 0.19g (reducción del 90.10%), y en niveles inferiores se sitúa entre 0.16g y 0.18g. Las reducciones superan el 80% en todos los niveles, evidenciando que el sistema de aislamiento es aún más efectivo en términos porcentuales ante demandas sísmicas mayores.

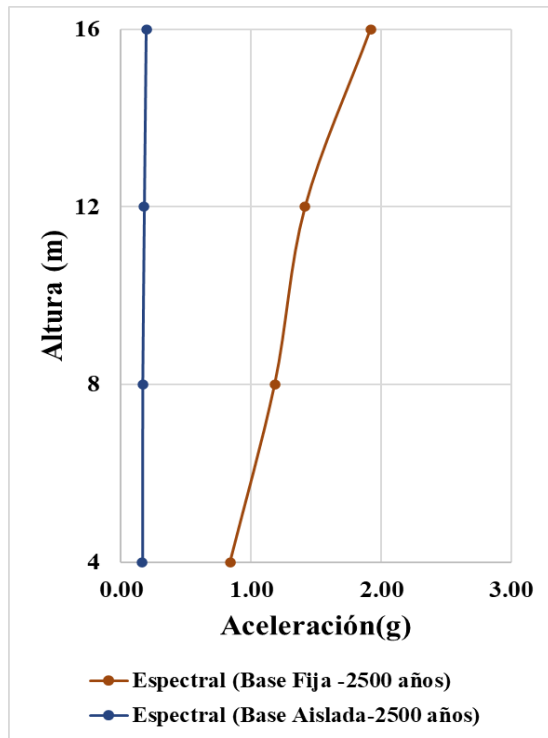
Tabla 54

Comparación de Aceleraciones: Modal Espectral 2500 años

Nivel	Espectral (Base Fija - 2500 años)	Espectral (Base Aislada-2500 años)	% Reducción
AZOTEA	1.92	0.19	89.90%
TECHO 3	1.41	0.18	87.38%
TECHO 2	1.18	0.17	86.00%
TECHO 1	0.84	0.16	80.42%

Figura 44

Comparación de Aceleraciones: Modal Espectral 2500 años



3.6.2.4.3 Tiempo Historia 2500 años — Base Fija vs. Base Aislada

El análisis Tiempo Historia bajo el MCE reporta las mayores aceleraciones en la base fija, con 2.63g en AZOTEA y 0.96g en TECHO 1, reflejando la amplificación dinámica bajo registros sísmicos reales. El aislamiento sísmico limita las aceleraciones a un rango de 0.14g–0.33g (reducciones del 65.44% al 87.45%). Las reducciones son ligeramente menores que en el análisis espectral porque el Tiempo Historia captura demandas de frecuencias altas no filtradas por el espectro de diseño. A pesar de esto, las aceleraciones bajo aislamiento se mantienen en rangos seguros para el contenido no estructural y los equipos de la edificación

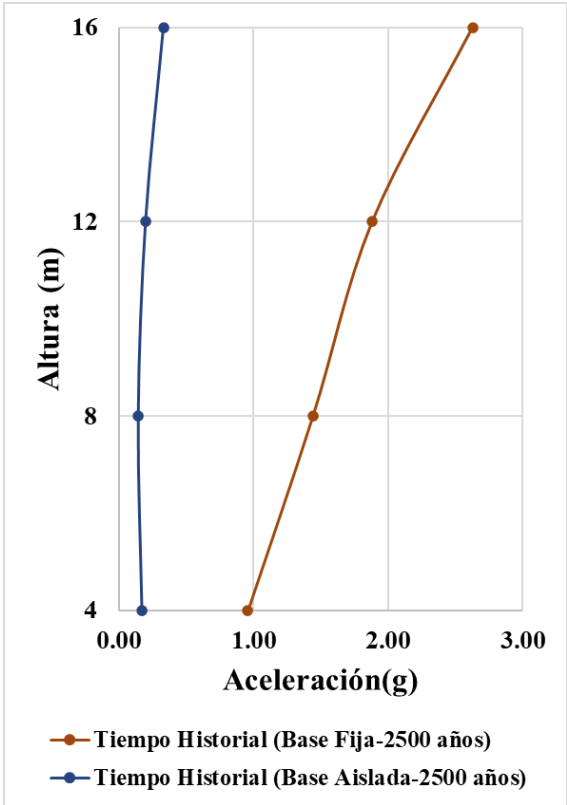
Tabla 55

Comparación de Aceleraciones: Tiempo Historia 2500 años

Nivel	Tiempo Historial (Base Fija-2500 años)	Tiempo Historial (Base Aislada-2500 años)	% Reducción
AZOTEA	2.63	0.33	87.5%
TECHO 3	1.88	0.20	89.6%
TECHO 2	1.44	0.14	90.1%
TECHO 1	0.96	0.17	82.2%

Figura 45

Comparación de Aceleraciones: Tiempo Historia 2500 años



CAPÍTULO IV. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1. Análisis de datos

4.2.1 Cortante de entre piso

En las siguientes tablas: Tabla 49, Tabla 50 y Tabla 51, presentan los resultados comparativos de cortante en la superestructura entre el sistema de base fija y la base aislada. El aislamiento sísmico intercepta y disipa la energía sísmica en la interfaz de aislamiento, reduciendo sustancialmente las fuerzas cortantes que deben resistir los elementos estructurales en todos los niveles. En el escenario más exigente, correspondiente al análisis Tiempo Historia bajo el Sismo Máximo Considerado (Tabla 51), el cortante en el nivel Techo 1 se reduce de 22,426.6 tonf a 2,234.8 tonf, representando una disminución del 90.04%. Esta reducción sistemática en todos los niveles y escenarios evaluados implica menores demandas sobre columnas, vigas y conexiones, lo que se traduce en un comportamiento estructural predominantemente elástico y en una significativa reducción del daño esperado ante sismos extraordinarios.

4.2.2 Derivas de entre piso

En las siguientes tablas: Tabla 46, Tabla 47 y Tabla 48, presentan los resultados comparativos de derivas de entrepiso entre el sistema de base fija y con base aislada. Los resultados evidencian que la incorporación de dispositivos de aislamiento en la base produce reducciones superiores al 88% en las derivas de entrepiso para la totalidad de los niveles evaluados, independientemente del nivel de amenaza sísmica considerado. Esta notable disminución de las deformaciones relativas entre pisos se traduce directamente en la protección del sistema no estructural, como es la tabiquería, fachadas, instalaciones y equipos, cuya integridad depende fundamentalmente del control de la distorsión de entrepiso. En consecuencia, el sistema de aislamiento sísmico no solo garantiza la seguridad estructural ante sismos de diseño y sismos máximos considerados, sino que además preserva la operatividad de la edificación durante y después del evento sísmico.

4.2.3 Aceleraciones

En las siguientes tablas: Tabla 53, Tabla 54 y en la Tabla 55, presentan los resultados comparativos de aceleraciones de entrepiso entre el sistema de base fija y el sistema con aislamiento sísmico. Los resultados demuestran reducciones que alcanzan el 90.55% en el nivel de azotea para el sismo de 500 años, donde la aceleración disminuye de 1.27g a 0.12g. Para el escenario más severo, correspondiente al Sismo Máximo Considerado

analizado mediante Tiempo Historia, la aceleración en azotea de la edificación con base fija asciende a 2.63g, magnitud que comprometería la seguridad de ocupantes y contenidos; con aislamiento sísmico esta demanda se reduce a 0.33g (87.45%). Esta reducción sistemática en todos los niveles y escenarios evaluados confirma que el sistema de aislamiento preserva la funcionalidad de equipos sensibles y garantiza condiciones de seguridad para los ocupantes ante sismos de diseño y extraordinarios."

4.2. Discusión de resultados

4.2.4 Cortante de entre piso

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema de aislamiento sísmico reduce las fuerzas cortantes en la superestructura entre un 82.33% y un 90.04%, valores que superan de manera considerable las reducciones del 54% reportadas por Rodríguez Jaramillo (2019) y el 64.63% obtenido por Aguirre Herrera y Vidal Barazorda (2022), lo que evidencia una mayor eficacia del sistema implementado en la presente investigación. En el escenario más exigente, correspondiente al análisis Tiempo Historia bajo el Sismo Máximo Considerado, el cortante en el nivel Techo 1 disminuye de 22,426.6 tonf a 2,234.8 tonf, confirmando que los aisladores elastoméricos filtran eficazmente la demanda sísmica en la interfaz de aislamiento y limitan las fuerzas transferidas a los elementos estructurales verticales, lo que se traduce en un diseño con menores secciones transversales y mayor eficiencia material.

4.2.5 Derivas de entre piso

Las derivas de entrepiso obtenidas en el sistema con aislamiento sísmico oscilan entre 0.0010 y 0.0039, valores que se sitúan por debajo de los límites establecidos por la norma E.031 (2019), la cual fija un máximo de 3.5‰ para el análisis espectral y 5‰ para el análisis Tiempo Historia. Las reducciones respecto al sistema de base fija superan el 91% en los niveles intermedios bajo el Sismo Máximo Considerado, resultado que mejora de manera significativa el 70% reportado por Yucra Ayala (2018) para el Hospital de Moquegua. Este comportamiento es consistente con lo planteado por Astroza (2019), quien sostiene que el aislamiento sísmico, a diferencia de la base fija, evita la concentración de deformaciones en pisos específicos y mantiene la superestructura dentro del rango elástico, condición necesaria para alcanzar el nivel de desempeño de Ocupación Inmediata ante sismos severos y garantizar la continuidad operativa de la edificación.

4.2.6 Aceleraciones

Las aceleraciones de entrepiso registradas en el sistema con aislamiento sísmico presentan reducciones de hasta el 90.55% bajo el sismo de diseño de 500 años, donde la aceleración en azotea disminuye de 1.27g a 0.12g, y del 87.45% en el escenario más severo correspondiente al análisis Tiempo Historia bajo el Sismo Máximo Considerado, con valores que no superan los 0.33g en ningún nivel. Estos resultados son consistentes con el monitoreo en tiempo real de edificaciones hospitalarias aisladas reportado por Cote et al. (2017) en Chile, y se aproximan al 93% de reducción documentado por Zegarra Araujo (2015). Las aceleraciones obtenidas, inferiores a 0.35g en el escenario más exigente, se mantienen por debajo de los umbrales de volcamiento y daño para equipos médicos y contenidos sensibles establecidos por Briones et al. (2021), confirmando que el sistema de aislamiento garantiza la protección del equipamiento crítico y la continuidad operativa de la edificación ante sismos de carácter extraordinario.

4.3. Contratación de hipótesis

La hipótesis general planteaba que el aislamiento sísmico en la base reduciría la cortante de entrepiso entre 60%-80%, las aceleraciones de piso entre 70%-90%, y las derivas en más del 50%, garantizando comportamiento elástico según la Norma E.031 (2019). Los resultados no solo confirman esta hipótesis, sino que superan los rangos proyectados: la cortante de entrepiso se redujo en 90.04%, las aceleraciones de piso en 90.55% (de 2.63g a 0.25g), y las derivas de entrepiso en 93.78%, evidenciando un desempeño estructural superior al estimado inicialmente.

Bajo el escenario de Sismo Máximo Considerado, el sistema aislado registró una deriva de 0.0039, por debajo del límite de 5% establecido por la Norma E.031 (2019), confirmando el comportamiento elástico de la superestructura. Esto garantiza la protección de equipos médicos críticos y la continuidad operativa del hospital. En consecuencia, se acepta la hipótesis general de investigación: el sistema de aislamiento sísmico mejora significativamente la respuesta estructural del hospital prototipo, superando los estándares de seguridad y resiliencia exigidos para edificaciones esenciales.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- La comparación del comportamiento estructural del hospital prototipo con base fija y base aislada, según la Norma E.031 (2019), evidenció que la implementación del sistema de aislamiento sísmico varía positivamente la respuesta de la edificación en todos sus niveles y escenarios de amenaza evaluados. Las reducciones obtenidas alcanzan el 90.04% en la fuerza cortante de entrepiso, el 90.55% en las aceleraciones de piso y el 93.78% en las derivas de entrepiso, confirmando que el sistema desplaza la respuesta estructural hacia el rango elástico y garantiza la continuidad operativa exigida para edificaciones esenciales.
- Al determinar las demandas sísmicas de la estructura de base fija y base aislada, se cuantificó que la base fija genera elevadas fuerzas inerciales ante el Sismo Máximo Considerado de 2,500 años, mientras que el sistema aislado mantiene las derivas de entrepiso en 0.0039 bajo el análisis Tiempo Historia, valor que se sitúa por debajo del límite de 5% establecido por la NTE E.031 (2019) y que protege los equipos médicos críticos y los componentes no estructurales.
- Al evaluar el comportamiento del sistema de aislamiento, se determinó que la reducción de aceleraciones de piso constituye el resultado más relevante para la funcionalidad hospitalaria: el sistema aislado reduce las aceleraciones de 2.63g a 0.33g en el escenario más exigente, una disminución del 87.45% que mantiene la demanda inercial por debajo de los umbrales de daño para equipos sensibles. Complementariamente, se cuantificó una reducción del 88.60% en la fuerza cortante en la base, validando que el comportamiento estructural del sistema aislado cumple con los estándares de resiliencia exigidos por la normativa vigente para establecimientos de salud.

5.2. Recomendaciones

- En futuros estudios se recomienda incorporar la Interacción Suelo-Estructura (ISE), permitiendo cuantificar el comportamiento estructural de un edificio aislado sobre un suelo blando.
- Se sugiere extender el alcance del estudio hacia un análisis Tiempo-Historia No Lineal en la super estructura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Civil Engineers. (2022). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures (ASCE/SEI 7-22)*. ASCE.
- Aguirre Herrera, S. A., & Vidal Barazorda, E. A. (2022). *Propuesta de diseño de dos hospitales, en zona sísmica tres y cuatro, usando disipadores SLB en el Perú como alternativa a los aisladores sísmicos exigidos por la NTP E.030* [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Académico UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/659464>
- Astroza, M., & Osses, R. (2022). *Seismic performance assessment of base-isolated and conventional hospitals through fragility functions*. *Engineering Structures*. <https://www.ing.uc.cl/publicaciones/seismic-performance-assessment-of-base-isolated-and-conventional-hospitals-through-fragility>
- Bernardo Zevallos, J. (2024). *Análisis y diseño sísmico comparativo entre aisladores LRB y disipadores histeréticos aplicados en un edificio hospitalario* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional UNI.
- Blanco Blasco, A. (1992). *Estructuración y diseño de edificaciones de concreto armado*. Ediciones Capítulo de Ingeniería Civil, Consejo Departamental de Lima.
- Côté, P., Briones, B., & Sanhueza, C. (2017). *Seismic monitoring of two isolated hospitals subjected to the Illapel 2015 earthquake*. 16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE). Santiago, Chile).
- Centro de Observación para la Ingeniería Sísmica del CISMID–FIC–UNI. (s. f.). *Registros de aceleración – Red Acelerográfica del CISMID (REDACIS)* [Base de datos]. <https://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/redacis/red/>
- Chopra, A. K. (2020). *Dinámica de estructuras: Teoría y aplicaciones a los terremotos*. Pearson.
- Clough, R. W., & Penzien, J. (2019). *Dinámica de estructuras*. Computers & Structures.

- Constantinou, M. C., & Whittaker, A. S. (2003). *Seismic isolation and energy dissipation systems*. Earthquake Engineering Research Institute.
- Dextre Morimoto, E. R. (2022). *Estudio de Mecánica de Suelos: Mejoramiento y ampliación de los servicios de salud del establecimiento de salud Simón Bolívar, distrito de Cajamarca - provincia de Cajamarca - departamento de Cajamarca* (Versión 001-2022; pp. 52). Gobierno Regional de Cajamarca, Proregión.
- Dynamic Isolation Systems. (s. f.). *Seismic isolation for buildings and bridges: Engineering – Isolator engineering properties* [Catálogo técnico]. Dynamic Isolation Systems.
- Filiatrault, A. (2002). *Elements of earthquake engineering and structural dynamics*. Presses Internationales Polytechnique.
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción al uso de aisladores y disipadores en estructuras*. IMME.
- Instituto Politécnico de Leiria. (s. f.). *Terremotos en el Cinturón de Fuego del Pacífico en el año 2016*. Seismic Knowledge. <https://sites.ipleiria.pt/seismicknowledge/cinturon-de-fuego-del-pacifico/>
- Kelly, J. M., & Naeim, F. (2020). *Diseño de estructuras con aislamiento sísmico: De la teoría a la práctica*. Wiley..
- Krawinkler, H., & Aschheim, M. (2000). *Seismic design and retrofit of structures*. John Wiley & Sons.
- Mercado Panduro, C. M. (2017). *Comparación de la respuesta estructural del sector E del Hospital Regional de Cajamarca con y sin el sistema antisísmico Tuned Mass Damper* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte].
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *Norma técnica de edificación E.030: Diseño sismorresistente*. Reglamento Nacional de Edificaciones.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2019). *Norma técnica E.031: Aislamiento sísmico: Aislamiento sísmico*. Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma técnica de edificación E.050: Suelos y cimentaciones*. Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma técnica de edificación E.060: Concreto armado*. Reglamento Nacional de Edificaciones.
- Morales Morales, R. (2006). *Diseño en concreto armado* (1.^a ed.). Fondo Editorial ICG.
- Norabuena Ramírez, E. C. (2019). *Diseño estructural con y sin aisladores sísmicos de un pabellón de tres pisos: Colegio Juan Bautista de la Salle, Yungay 2018* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/41333/Norabuena_REC-Rosario_BTR.pdf
- Oviedo Sarmiento, R. (2016). *Diseño sismorresistente de edificaciones de concreto armado* (1.^a ed.). Oviedo Ingeniería EIRL.
- Ottazzi Pasino, G. (2014). *Apuntes del curso análisis estructural I* [Material académico]. Pontificia Universidad Católica del Perú. https://www.academia.edu/43429476/2014_Gianfranco_Ottazzi_Pasino_APUNTES_DEL_CURSO_ANALISIS_ESTRUCTURAL_I_PONTIFICIA_UNIVERSIDAD_CATOLICA_DEL_PERU
- Paz, M., & Leigh, W. (2004). *Structural dynamics: Theory and computation*. Springer.
- Perú. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2016). *Decreto Supremo N.º 022-2016-VIVIENDA: Reglamento de acondicionamiento territorial y desarrollo urbano sostenible*. Diario Oficial El Peruano.
- Portillo Cazorla, A. R. (2019). *Diseño de un hospital con aislamiento sísmico según la NTP E.031* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Alicia-CONCYTEC.

https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/PUCP_b85e4849b2c08d6740c0690f72229b86

- Pino, M. (2018). *Factibilidad técnica y económica de utilizar aislamiento sísmico en hospitales peruanos existentes*.
- Rodríguez Jaramillo, M. A. (2019). *Diseño de un edificio hospitalario con aislamiento sísmico de base* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio de Tesis PUCP. <https://tesis.pucp.edu.pe/items/b350ac02-fab4-44fb-9acb-34e53ec72381>
- Ruiz, C., & Torres, A. (2018). *Análisis comparativo del comportamiento sísmico dinámico de estructuras esenciales con aisladores LRB y disipadores BRB y su incidencia en la relación costo/beneficio del sistema estructural*.
- San Martín Altamirano, L. M. (2022). *Estudio de las propiedades mecánicas y dinámicas de aisladores elastoméricos con núcleo de plomo en base a su dimensionamiento interno* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Toledo, V. (2011). *Ingeniería sísmica basada en desempeño* (1.^a ed.).
- Universidad Nacional de Ingeniería – UNI75PAIME. Mendo, A. (2025). *Vulnerability on base-isolated buildings and horizontal irregularities in Cajamarca* [Artículo científico]. <https://www.uni75paime.org/projects/aisladas>
- Urizar Monzón, R. E. (2016). *Comparación del comportamiento estructural de edificación de concreto, utilizando aisladores elastoméricos en la base* [Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/6283/1/Ronald%20Enrique%20Urizar%20Monz%C3%B3n.pdf>
- Wilson, E. L. (2002). *Three-dimensional static and dynamic analysis of structures*. Computers & Structures.
- Yucra Ayala, M. E. (2018). *Evaluación del desempeño sísmico de hospitales aislados en el Perú* [Tesis de posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP

ANEXOS



10.0 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. El Hospital Simón Bolívar de Cajamarca, donde se ubica el proyecto, está en un terreno donde el nivel de peligro por sismo es Alto.
2. De acuerdo con la estratigrafía de la zona en estudio, propiedades mecánicas, espesor del estrato, periodo fundamental de vibración y la velocidad de propagación de las ondas de corte; el suelo subyacente está definido por la siguiente clasificación de acuerdo con el Decreto Supremo N° 003-2016 – Vivienda que modifica las Normas de Diseño Sismo Resistente E.030.

POTENCIA ESTRATO	TIPO DE SUELO	CLASIFICACION
0.00 mts. – 6.80 mts	Suelos intermedios – suelos medianamente rígidos con velocidades de propagación de onda de corte entre 250 m/s y 700 m/s	S₂
6.80 – 20.00 mts	Suelos rígidos – suelos rígidos con velocidades de propagación de onda de corte a entre 700 m/s y 1350 m/s	S₁
Más de 20 m	Suelos rígidos – suelos rígidos con velocidades de propagación de onda de corte a mayor de 1350 m/s	S₁

3. De acuerdo con la nueva Norma Técnica de Edificación E-030 Diseño Sismo Resistente y predominio del suelo de cimentación, se recomienda adoptar en los análisis sismo - resistente de las edificaciones, los siguientes parámetros a nivel de cimentación:

Parámetros Sismo Resistentes según Norma Técnica E.030 Diseño Sismo Resistente para suelos Tipo SUCS: SC.

- Factor de Zona : $Z = 0.35$
- Tipo de suelo : S_2
- Factor de suelo : $S = 1.15$
- Período : $T_p = 0.60$ $T_I = 2.00$

JULIO ANTONIO HIGASHI LUY
INGENIERO CIVIL
Reg CIP N° 42080

4. Cimentación en Edificaciones con aisladores sísmicos y edificaciones de uno y dos pisos y Muros Perimetrales:



ALFREDO ZEGARRA TAMBO
INGENIERO CIVIL
Reg. CIP N° 58647

Eduardo Dextre Morimoto
JEFE DE PROYECTO
C.A.P. 2839

Eduardo Dextre Morimoto
ARQUITECTO
CAP. 2839



Engineering

Isolator Engineering Properties

Isolator Properties: Metric Units

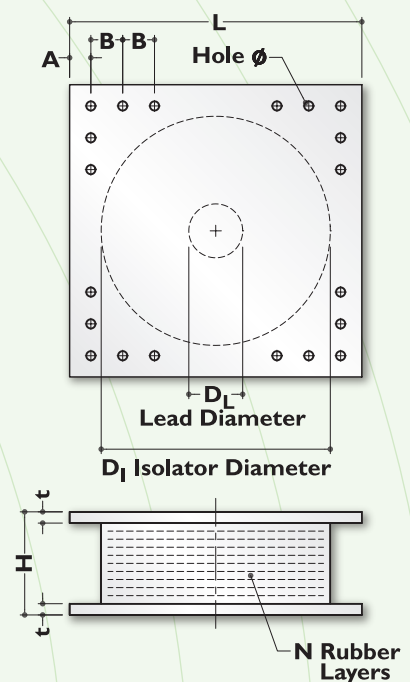
DEVICE SIZE				MOUNTING PLATE DIMENSIONS					
Isolator Diameter, D_I (mm)	Isolator Height, H (mm)	Number of Rubber Layers, N	Lead Diameter D_L (mm)	L (mm)	t (mm)	Hole Qty.	Hole $\varnothing$ (mm)	A (mm)	B (mm)
305	125-280	4-14	0-100	355	25	4	27	50	-
355	150-305	5-16	0-100	405	25	4	27	50	-
405	175-330	6-20	0-125	455	25	4	27	50	-
455	175-355	6-20	0-125	510	25	4	27	50	-
520	205-380	8-24	0-180	570	25	8	27	50	50
570	205-380	8-24	0-180	620	25	8	27	50	50
650	205-380	8-24	0-205	700	32	8	27	50	50
700	205-430	8-30	0-205	750	32	8	33	65	75
750	230-455	8-30	0-230	800	32	8	33	65	75
800	230-510	8-33	0-230	850	32	8	33	65	75
850	230-535	8-35	0-255	900	38	12	33	65	95
900	255-560	9-37	0-255	955	38	12	33	65	95
950	255-585	10-40	0-280	1005	38	12	33	65	95
1000	280-635	11-40	0-280	1055	38	12	40	75	115
1050	305-660	12-45	0-305	1105	44	12	40	75	115
1160	330-760	14-45	0-330	1205	44	12	40	75	115
1260	355-760	16-45	0-355	1335	44	16	40	75	115
1360	405-760	18-45	0-380	1435	51	16	40	75	115
1450	430-760	20-45	0-405	1525	51	20	40	75	115
1550	455-760	22-45	0-405	1625	51	20	40	75	115

(1) The axial load capacities correspond to maximum displacements based on design limits of 250% rubber shear strain or 2/3 the isolator diameter. An isolator's actual displacement and load capacity are dependent on the rubber modulus and number of rubber layers.

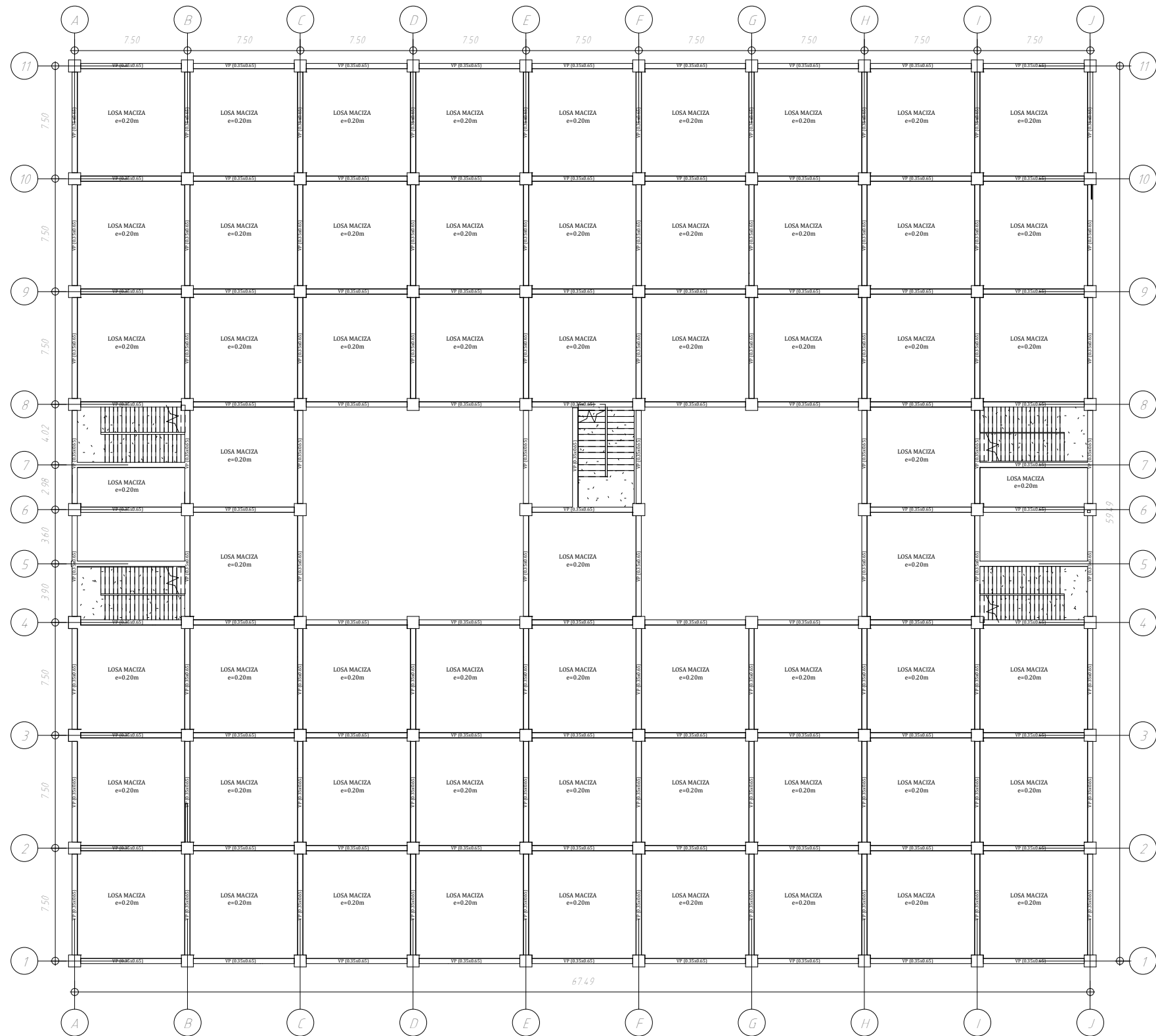
(2) Rubber Shear Moduli (G) are available from 0.38 N/mm² to 0.70 N/mm².

(3) For analytical bilinear modeling of the Elastic Stiffness use $K_e = 10 \cdot K_d$.

Isolator Diameter, D_I (mm)	DESIGN PROPERTIES			Maximum Displacement, D_{max} (mm)	Axial Load Capacity P_{max} (kN)
	Yielded Stiffness, K_d (kN/mm)	Characteristic Strength Q_d (kN)	Compression Stiffness, K_v (kN/mm)		
305	0.2-0.9	0-65	>50	150	450
355	0.2-1.2	0-65	>100	150	700
405	0.3-1.6	0-110	>100	200	900
455	0.3-2.0	0-110	>100	250	1,150
520	0.4-2.3	0-180	>200	300	1,350
570	0.5-2.8	0-180	>500	360	1,800
650	0.5-3.5	0-220	>700	410	2,700
700	0.5-4.2	0-220	>800	460	3,100
750	0.7-4.7	0-265	>900	460	3,600
800	0.7-5.3	0-265	>1,000	510	4,000
850	0.7-6.1	0-355	>1,200	560	4,900
900	0.7-6.1	0-355	>1,400	560	5,800
950	0.7-6.1	0-490	>1,800	610	6,700
1000	0.8-6.3	0-490	>1,900	660	7,600
1050	0.9-6.3	0-580	>2,100	710	8,500
1160	1.1-6.5	0-665	>2,800	760	13,800
1260	1.2-6.7	0-755	>3,700	810	20,500
1360	1.4-7.0	0-890	>5,100	860	27,600
1450	1.6-7.2	0-1,025	>5,300	910	33,400
1550	1.8-7.4	0-1,025	>6,500	910	40,000



PLANOS



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Proyecto: " Análisis del comportamiento estructural de hospitales, con y sin sistema de aislamiento sísmico en la base frente a un evento sísmico, en zona tipo 3, según Norma Técnica Peruana E-031 "

Tesista: Sánchez Muñoz Dora del Rosario

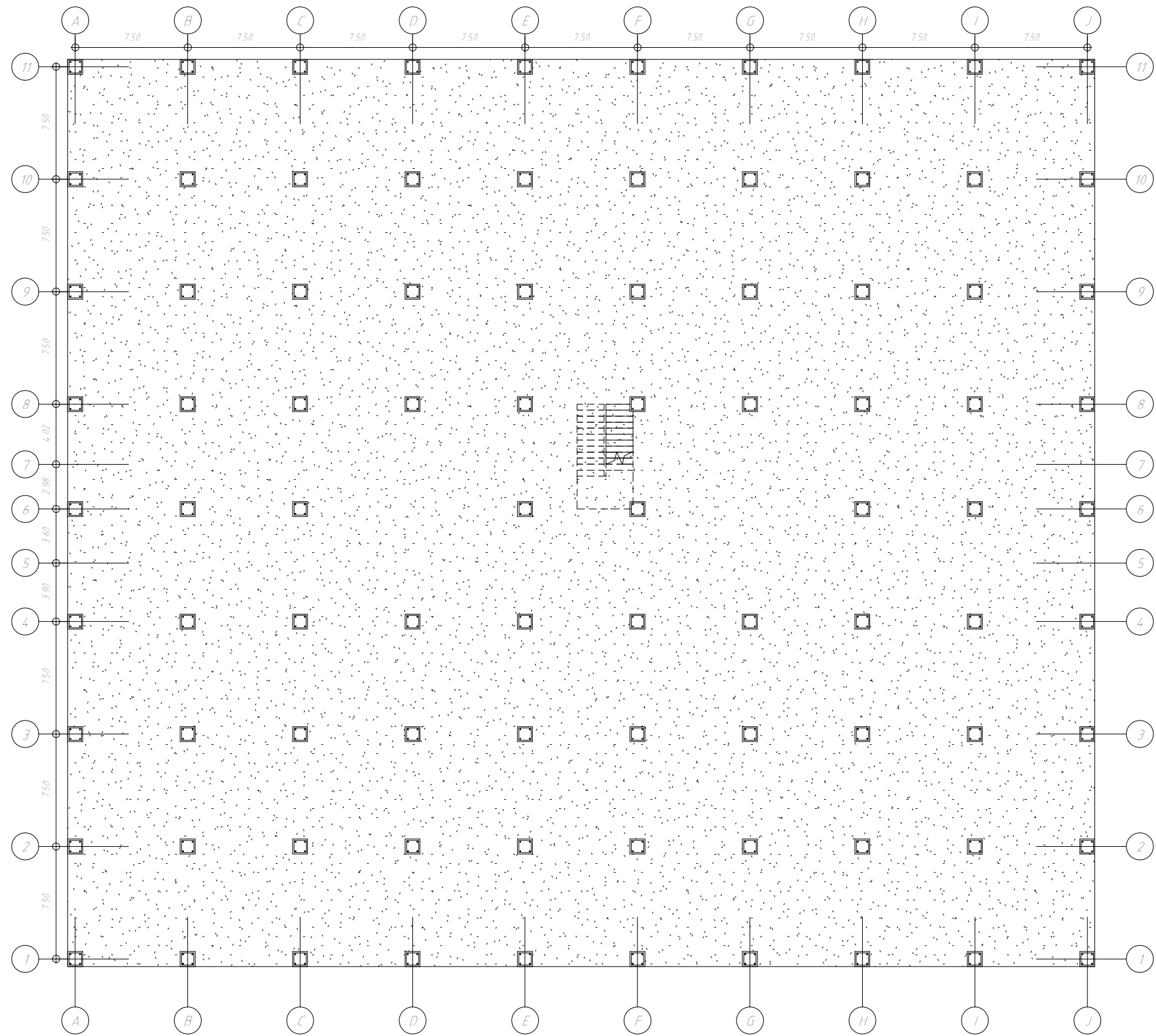
Especialidad: Estructuras

Plano: Planta del 1er piso

Escala: 1/300

PLANO N°

1



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Proyecto: " Análisis del comportamiento estructural de hospitales, con y sin sistema de aislamiento sísmico en la base frente a un evento sísmico, en zona tipo 3, según Norma Técnica Peruana E-031 "

Tesista: Sánchez Muñoz Dora del Rosario

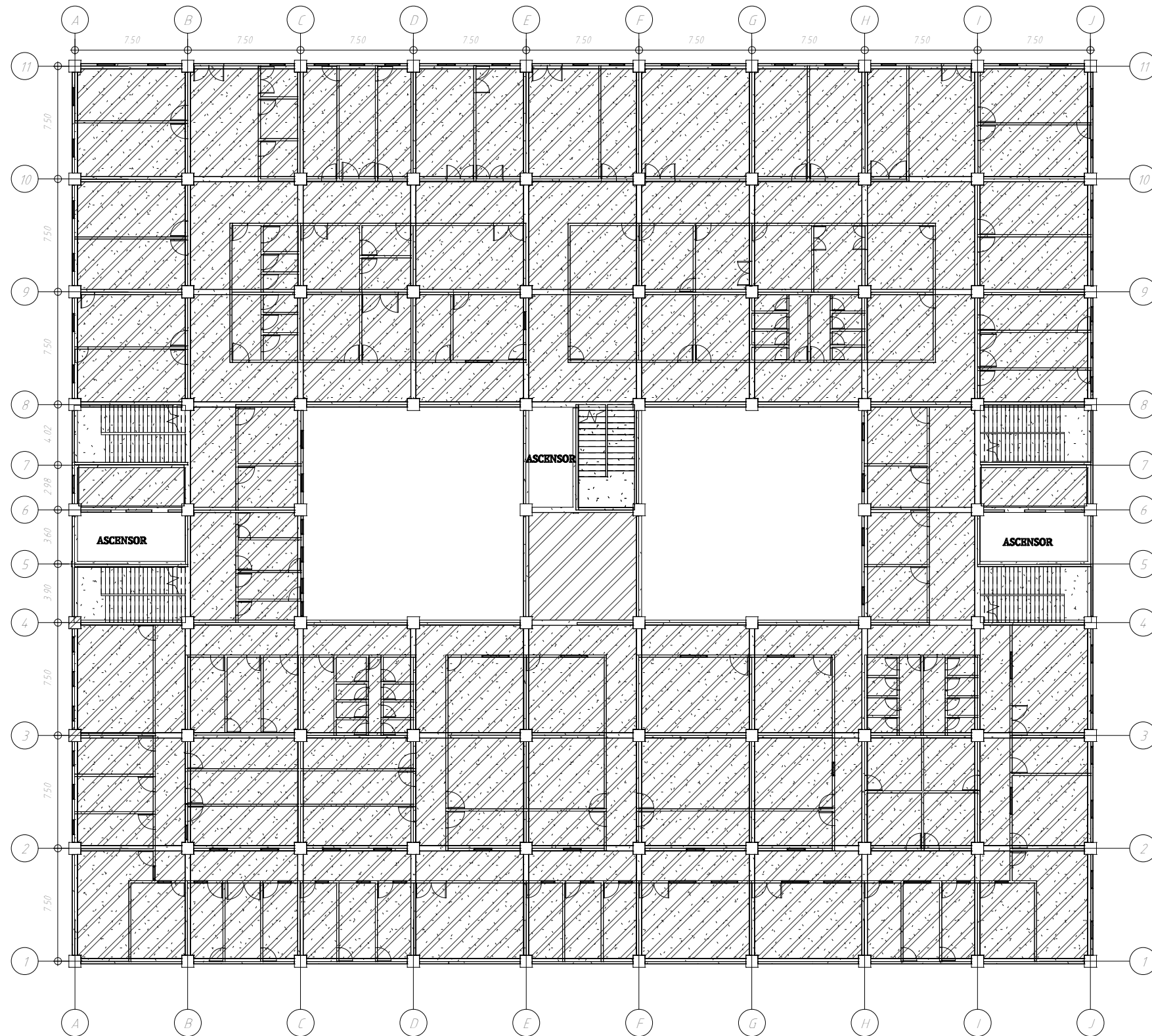
Especialidad: Estructuras

Plano: Planta de la base de aislamiento

Escala: 1/300

PLANO N°

2



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Proyecto: " Análisis del comportamiento estructural de hospitales, con y sin sistema de aislamiento sísmico en la base frente a un evento sísmico, en zona tipo 3, según Norma Técnica Peruana E-031 "

Tesista: Sánchez Muñoz Dora del Rosario

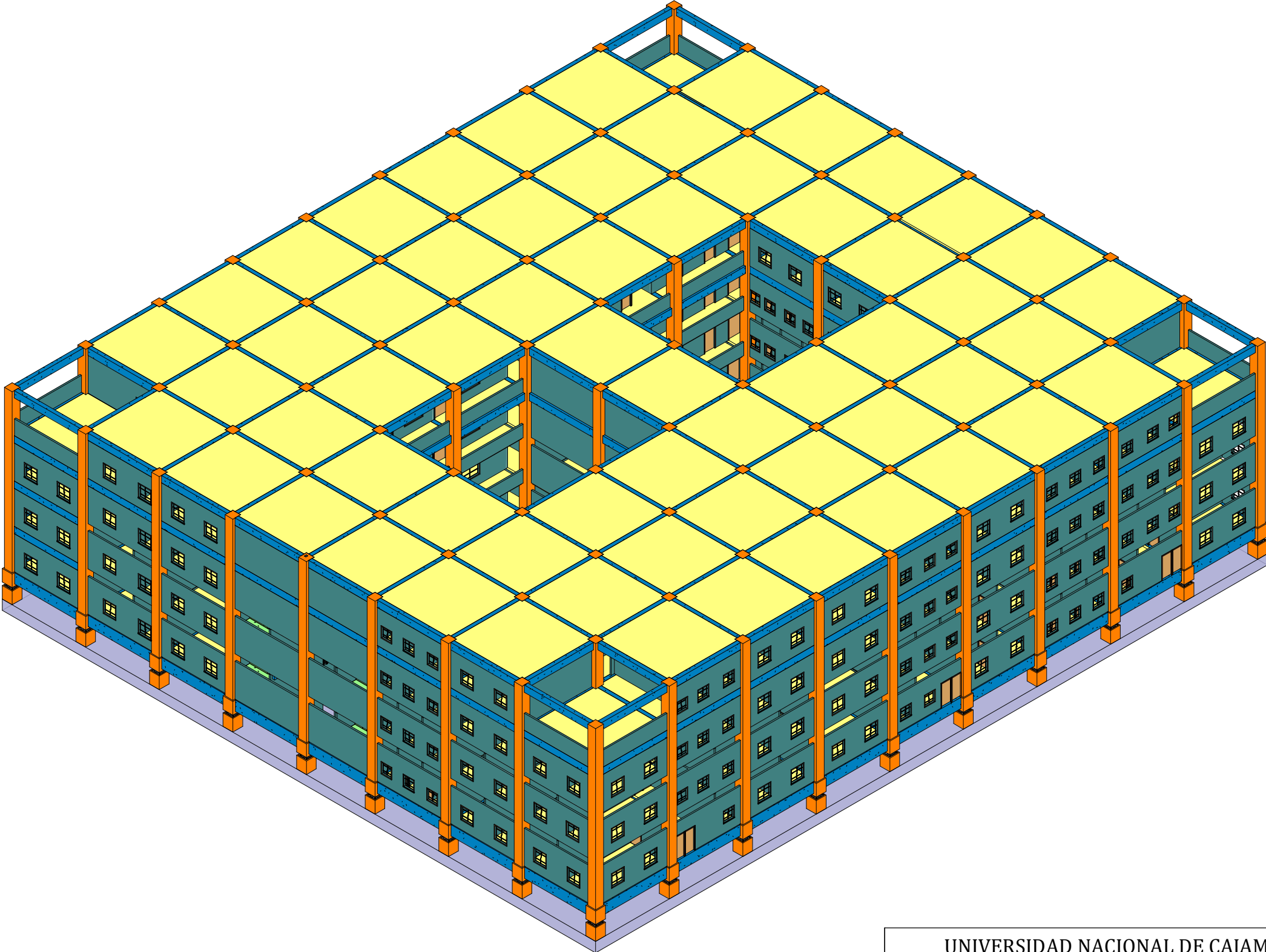
Especialidad: Arquitectura

Plano: Planta del 1er piso

Escala: 1/300

PLANO N°

3



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

Proyecto: " Análisis del comportamiento estructural de hospitales, con y sin sistema de aislamiento sísmico en la base frente a un evento sísmico, en zona tipo 3, según Norma Técnica Peruana E-031 "

Tesista: Sánchez Muñoz Dora del Rosario

Especialidad: Arquitectura

Plano: Plano en 3D

Escala: 1/300

PLANO N°
4