

UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

Escuela Profesional de Ingeniería Civil



Una Institución Adventista

Estimación de la fragilidad sísmica de colegios construidos entre 2000-2015 en la región de Tacna - Perú

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Por:

David Sulca Ataco

Darwin Danilo Vallejos Consa

Luis Fernando Mamani Catunta

Asesor:

Ing. Herson Duberly Pari Cusi

Juliaca, noviembre de 2022

DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

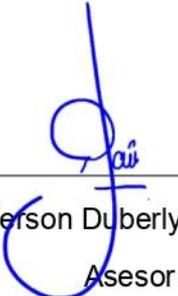
Ing. Herson Duberly Pari Cusi, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: **“ESTIMACIÓN DE LA FRAGILIDAD SÍSMICA DE COLEGIOS CONSTRUIDOS ENTRE 2000-2015 EN LA REGIÓN DE TACNA-PERÚ”** constituye la memoria que presentan los Bachilleres **David Sulca Ataco, Darwin Danilo Vallejos Consa y Luis Fernando Mamani Catunta** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Civil, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad de los autores, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 10 días del mes de noviembre del año 2022



Ing. Herson Duberly Pari Cusi
Asesor

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS



En Puno, Juliaca, Villa Chullunquiani, a 09 día(s) del mes de noviembre del año 2022, siendo las 16:00 horas, se reunieron los miembros del jurado en la Universidad Peruana Unión Campus Juliaca, bajo la dirección del (de la) presidente(a):

Ing. Juana Beatriz Aguirre Pari, el (la) secretario(a): Mg. Henry Antenor Aguilar Lhuguimisa y los demás miembros: Dr. Leonel Suaraca Celino y el (la) asesor(a) Ing. Herson Duberly Pari

Luis con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulado: Estimación de la fragilidad sísmica de colegios construidos entre 2000-2015 en la región de Tacna - Perú

- del(los) bachiller(es): a) David Sullca Ataco
 b) Darwin Danilo Vallejos Lonsa
 c) Luis Fernando Mamani Latunta

conducente a la obtención del título profesional de: Ingeniero Civil
(Denominación del Título Profesional)

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Bachiller (a): David Sullca Ataco

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>14</u>	<u>C</u>	<u>Aceptable</u>	<u>Bueno</u>

Bachiller (b): Darwin Danilo Vallejos Lonsa

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

Bachiller (c): Luis Fernando Mamani Latunta

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
<u>Aprobado</u>	<u>16</u>	<u>B</u>	<u>Bueno</u>	<u>Muy Bueno</u>

(*) Ver parte posterior
 Finalmente, el Presidente del jurado invitó al (a la) / a (los) (las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

[Firma]
 Presidente/a
[Firma]
 Asesor/a
[Firma]
 Bachiller (a)

[Firma]
 Miembro
[Firma]
 Bachiller (b)

[Firma]
 Secretario/a
[Firma]
 Miembro
[Firma]
 Bachiller (c)

DEDICATORIA

A mis padres Pablo y Gloria les dedico el presente trabajo porque han fomentado en mí el deseo de superación aun cuando ya lo había perdido, por todos sus consejos que me ayudaron a crecer con humildad y a sus enseñanzas, con sacrificio y arduo trabajo se obtienen las mejores cosas.

De igual forma agradezco a mis hermanos y familiares cercanos que siempre creyeron y me apoyaron durante todo el proceso, en especial a mi Hermana Shayron la cual fue pilar fundamental para que logre acabar la carrera y obtener mi título profesional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por todas las bendiciones otorgadas en mi vida y sobre todo por haberme dado una familia que siempre ha creído en mí.

También agradezco mucho a mis hermanos que contribuyeron mucho para obtener este logro; espero siempre contar con ellos y con todas las personas que siempre confiaron en mí.

A los catedráticos y docentes por compartir sus conocimientos y por la paciencia con la que nos guiaron durante todo nuestro desarrollo académico.

INDICE GENERAL

DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
INDICE GENERAL	vi
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS	viii
INDICE DE ANEXOS	x
1. INTRODUCCIÓN	13
2. METODOLOGÍA	16
2.1. Metodología para la elaboración de curvas de fragilidad:.....	16
2.2. Definición de edificios índice	17
2.3. Descripción de los materiales:.....	19
2.4. Definir los componentes del análisis y elección del modelo matemático	21
2.5. Cargas empleadas en la modelación.....	24
2.6. Combinación de cargas para el análisis dinámico no lineal	24
3. DEMANDA SÍSMICA Y SELECCIÓN DE REGISTROS ACELEROGRAFICOS	24
3.1. Redes acelerográficos en el Perú.....	24
3.2. Selección de registros acelerográficos	25
3.3. Ajuste de los espectros de respuesta	26
3.4. Procesamiento de los registros acelerográficos para el análisis	28
4. CURVAS DE CAPACIDAD	32
5. ANÁLISIS DINAMICO NO LINEAL.....	33
6. CURVAS DE FRAGILIDAD	37
6.1. Curvas de fragilidad con estados de daño según Hazus Mr4	37
7. CONCLUSIONES	42
8. RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS / REFERENCES	45
ANEXOS.....	47

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencias tomadas por esclerómetro I.E. Ramón Copaja	20
Tabla 2. Características y propiedades de la albañilería en estudio según planos.....	21
Tabla 3. Coeficientes para cada estado límite según.....	22
Tabla 4. Derivas representativas para los tipos de ladrillo ($x 10 - 3$),	22
Tabla 5. Datos del muro en estudio obtenidas de los planos.....	22
Tabla 6. Propiedades para la creación del muro de albañilería usando links (enlaces) en el software sap 2000 (Fuerza-Desplazamiento)	23
Tabla 7. Serie de 7 eventos sísmicos utilizados para el estudio	25
Tabla 8. Valores utilizados conforme a lo indicado en la NTP E030	26
Tabla 9. Periodos obtenidos en cada sentido y para cada IE.....	26
Tabla 10. Duraciones consideradas según lo indicado para cada registro sísmico	32
Tabla 11. Resultados de los desplazamientos máximos	36
Tabla 12. Parámetro de daño según Hazus	38
Tabla 13. Resultados de los porcentajes de daño e índice de daño global esperado por cada sismo.....	40

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Secuencia para el cálculo de curvas de fragilidad.....	16
Figura 2. Vista en elevación, planta y detalles estructurales del centro educativo Ramón Copaja.....	18
Figura 3. Vista en elevación, planta y detalles estructurales del centro educativo Ramón Castilla.....	18
Figura 4. Vista en elevación, planta y detalles estructurales del centro educativo Simón Bolívar.....	19
Figura 5. Organigrama de características de edificios tipo.....	20
Figura 6. E. R. de los sismos en el eje X-X.....	27
Figura 7. E. R. de los sismos en el eje Y-Y.....	28
Figura 8. R. A. del evento sísmico del 23 de junio del 2001 , dirección EW (Moquegua-Perú, red Cismid-UNI).	29
Figura 9. R. A. del evento sísmico del 23 de junio del 2001 , dirección NS (Moquegua-Perú, red Cismid-UNI).	29
Figura 10. Gráfico de “Husid” muestra la duración del sismo de junio del 2001 en Moquegua-Perú, red Cismid-UNI, dirección Este-Oeste (EW).	30
Figura 11. Gráfico de “Husid” muestra la duración del sismo de junio del 2001 en Moquegua-Perú, red Cismid-UNI, dirección Norte-Sur (NS).....	30
Figura 12. Registro acelerográfico con los recortes de la duración significativa para el evento sísmico de junio del 2001 en Moquegua-Perú, red Cismis-UNI, dirección Este-Oeste (EW)	31
Figura 13. Registro acelerográfico con los recortes de la duración significativa para el evento sísmico de junio del 2001 en Moquegua-Perú, red Cismis-UNI, dirección Norte-Sur (NS)	31
Figura 14. Estados de daño en las curvas de capacidad	33
Figura 15. Modelo de edificio índice tipo 1.....	34
Figura 16. Modelo de edificio índice tipo 2.....	35
Figura 17. Modelo de edificio índice tipo 3.....	35
Figura 18. Modelo de edificio Tipo 1.....	38
Figura 19. Curva de fragilidad del Modelo de edificio Tipo 1 obtenida con Macro de hoja de cálculo (21).	39

Figura 20. Curva de fragilidad del Modelo de edificio Tipo 2 obtenida con Macro de hoja de cálculo (21).	39
Figura 21. Curva de fragilidad del Modelo de edificio Tipo 3 obtenida con Macro de hoja de cálculo (21).	40

INDICE DE ANEXOS

Anexo A. Fichas de recolección de datos para ensayos de esclerometria (Ver fichas completas en PDF adjunto).....	47
Anexo B . Planos (Para visualizar todos, ver PDF adjunto)	48

Estimación de la fragilidad sísmica de colegios construidos entre 2000-2015 en la región de Tacna-Perú

RESUMEN

El presente artículo estima la fragilidad sísmica de colegios de la región de Tacna construidos entre el 2000 y 2015, con la finalidad de predecir el desempeño sísmico de la estructura, identificando sus parámetros estructurales, planteando un modelo dinámico no lineal y simulando el comportamiento. Se recopiló información de tres modelos estándar; obteniendo la resistencia de cada elemento estructural mediante ensayos no destructivos, para posteriormente utilizarlo en el modelamiento y análisis dinámico no lineal tiempo-historia, que consiste en someter la estructura a diferentes registros sísmicos, los mismos que fueron amplificados para generar curvas de respuesta con las derivas de la edificación versus la amplificación de cada nivel de intensidad. Los resultados obtenidos revelan que la edificación tipo 2 recibe un daño Moderado del 91.64%, el tipo 3 recibe un daño Extensivo del 92.91% y el tipo 1 recibe un daño Completo del 65.58% ante sismos intensificados al 200% de la gravedad.

Palabras clave: Fragilidad sísmica; curvas de fragilidad; análisis dinámico incremental; ensayo no destructivo; estados de daño; parámetros indicadores de daño; registro sísmico.

Estimation of the seismic fragility of schools built between 2000-2015 in the Tacna-Peru region.

ABSTRACT

This paper estimates the seismic fragility of schools in the Tacna region built between 2000 and 2015, in order to predict the seismic behavior of the structure, identifying its structural parameters, proposing a nonlinear dynamic model and simulating the behavior. Information was collected from three standard models; obtaining the resistance of each structural element through non-destructive testing, and then using it in the modeling and nonlinear dynamic time history analysis, which consists of subjecting the structure to different seismic records, which were amplified to generate response curves with the drifts of the building versus the amplification of each intensity level. The results obtained reveal that building type 2 receives a Moderate damage of 91.64%, type 3 receives an Extensive damage of 92.91% and type 1 receives a Complete damage of 65.58% in the face of earthquakes intensified to 200% of gravity.

Keywords: Seismic fragility; brittle curves; incremental dynamic analysis; non-destructive testing; damage states; damage indicator parameters; seismic record.

1. INTRODUCCIÓN

El Perú es un país de alta sismicidad, el cual ha sido devastado por terremotos en gran parte de su territorio, registrándose cada uno de estos en memorias históricas evidenciando que en los últimos 500 años la costa peruana ha sufrido más de 35 sismos de gran intensidad con magnitudes iguales o superiores al M-7.5 (1), generando destrucción y pérdidas humanas en cada una de las regiones costeras; considerando que los sismos seguirán ocurriendo de manera cíclica por lo que si anteriormente ocurrió un sismo, sin lugar a duda ocurrirá otro con magnitud similar o superior al precedente (2).

Según Hernando Tavera (3) presidente ejecutivo del Instituto Geofísico del Perú (2021) anteriormente teníamos el termino de que “una laguna o zona de silencio sísmico es una región en la cual no ocurre un sismo importante durante un periodo de años bastante largo, pero que está bordeada por regiones donde ocurrieron sismos recientemente”; actualmente el termino mucho más cuantitativo y exacto es “las zonas de acoplamiento sísmico” donde los esfuerzos deben acumularse en el tiempo hasta vencer la resistencia de las placas en movimiento o lograr su desacople, entonces en estas áreas ocurrirá un sismo de gran magnitud.

En la actualidad las zonas de acoplamiento sísmico han sido identificadas frente a la región de Lima pudiendo dar una magnitud del orden M8.8, y en las zonas de Nazca-Chala y Moquegua-Tacna pudiendo generar sismos de M8.0. Recordando que el último sismo significativo que vivió la región de Tacna fue el 23 de junio del 2001 con una magnitud de 8.4Mw, afectando aproximadamente a 220 mil personas teniendo como consecuencia daños personales y materiales significativos (4)

Por lo descrito anteriormente, es necesario realizar investigaciones que permitan conocer la capacidad de las edificaciones consideradas como esenciales, ya que deben permanecer operativas luego de un próximo sismo de gran magnitud; sabiendo que en caso de emergencia y desastres estas estructuras serán usadas como lugares de refugio, albergues y almacenamiento de suministros. Es por eso que, al momento de ser construidas según norma técnica, las edificaciones esenciales deben cumplir con lo mencionado (5).

Por lo que la presente investigación busca estimar la fragilidad sísmica de los centros educativos de la región de Tacna, sabiendo que el riesgo de pérdidas humanas es mayor en centros educativos de nivel inicial, primario y secundaria debido a que la capacidad de respuesta en los estudiantes ante un eventual movimiento sísmico no siempre es la esperada.

Actualmente existen diversos métodos que permiten estimar la fragilidad sísmica de estructuras, destacando los basados en observaciones de campo, métodos experimentales y métodos analíticos siendo los de mayor exactitud, D'Ayala et al.(6), los clasifica de la siguiente manera:

Análisis estático lineal: basado en modelos de mecanismo simplificado por métodos no numéricos, lo cual no requiere modelación por elementos finitos, calcula los desplazamientos y las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción bajo el efecto de cargas aplicadas, el objetivo es solo analizar la estructura.

Análisis estático no lineal: Perfil de carga lateral basado en desempeño, el primer modo de ubicación para realizar un análisis pushover del modelo matemático 2d o 3d, calcula los desplazamientos y las deformaciones unitarias, las tensiones y las fuerzas de reacción bajo el efecto de cargas aplicadas, realizadas hasta la falla de la estructura.

Análisis dinámico no lineal: La Norma E030 (5), nos indica utilizar como mínimo 3 conjuntos de registros sísmicos con sus 2 componentes ortogonales; y en caso se utilicen siete juego de registros de movimientos del suelo, las fuerzas de diseño, las deformaciones en los elementos, y las distorsiones de entrepiso se evalúan a partir de los promedios correspondientes resultados máximos obtenidos en los distintos análisis. Si se utilizaran menos de siete juegos de registros las fuerzas de diseño, las deformaciones y las distorsiones de entrepiso son evaluadas a partir de los máximos valores obtenidos de todos los análisis.

Después de seleccionar el tipo de análisis estructural (análisis dinámico no lineal tiempo historia), se define la cantidad de tres (03) edificios tipo, reconociendo que los componentes que serán analizados serán solo estructurales (muros, columnas y vigas) siendo representados mediante un modelo matemático de múltiples grados de libertad.

Así mismo, (7) recomiendan usar la aceleración espectral (S_a) como el parámetro indicador de intensidad sísmica; luego seleccionar muestras de los sismos representativos teniendo en cuenta la variabilidad de los mismos y escalándolos hasta cierto nivel de intensidad sísmica. Finalmente se establece a la deriva entrepiso como parámetro cuantificador de daño que sufrirá la infraestructura.

En consecuencia, el objetivo de la presente investigación es estimar la fragilidad sísmica de los colegios en estudio; el artículo se divide en a) selección y delimitación de la estructura en análisis b) selección del modelo y seteo de condiciones c) recolección de información para modelado d) análisis de resultados.

Adicionalmente se espera construir con los resultados del análisis incremental (IDA) las curvas de fragilidad que permitan predecir la probabilidad de alcanzar un nivel de daño asociado a un nivel de intensidad sísmico y qué podríamos hacer en caso de daño, definiendo para ello estados límites de daño conforme a las normativas internacionales correspondientes (8).

2. METODOLOGÍA

2.1. Metodología para la elaboración de curvas de fragilidad:

En el siguiente flujograma se resumen los principales componentes de la metodología para la elaboración de las curvas de fragilidad; iniciando con los datos preparatorios para el análisis, ejecutando el análisis y posteriormente con la estimación de pérdidas obtener de resultados. Tomando como referencia la investigación de Fernández y Grijalva(8).

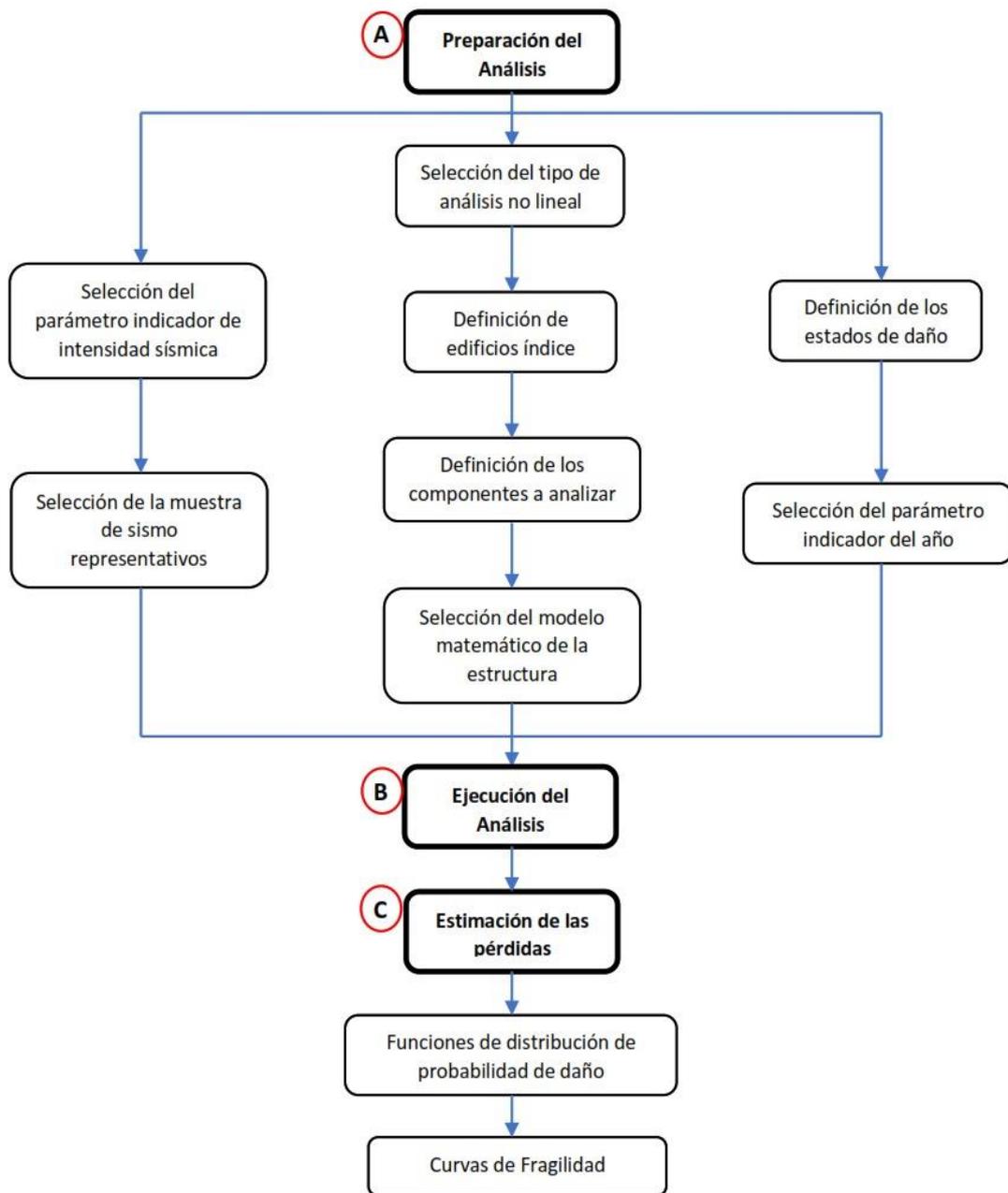


Figura 1. Secuencia para el cálculo de curvas de fragilidad.

Fuente: Elaboración propia

2.2. Definición de edificios índice

Para contabilizar el número de colegios construidos en Tacna entre los años 2000-2015, para ello se utilizó el contenido e información que se encuentra en la plataforma única del estado peruano – Programa nacional de infraestructura educativa donde tomamos como referencia las resoluciones que aprueban la liquidación final de contrato.

Consultando en las páginas web de las entidades públicas como la Unidad de Gestión Educativa local Tacna (9), y la dirección regional de educativa Tacna (10), se contabilizó un total de 150 centros educativos construidos en el periodo mencionado, reconociendo 3 tipologías estructurales con las siguientes característica (híbridos de pórticos y albañilería confinada), pero con estructuraciones diferentes.

Dado que se encontró con un número limitado de muestras debido a la poca información y las pocas actas de recepción de obra, se procedió con la selección del objeto de estudio, recurriendo al criterio ingenieril que fue elegir las edificaciones predominantes de la región de Tacna.

La tipología estructural que presentan estas edificaciones son: En el sentido longitudinal presenta un sistema de marcos de concreto con paredes desligadas que no cumple función estructural. En su sentido transversal presenta un sistema dual con marcos de concreto reforzado y muros de albañilería confinada para las divisiones de ambientes que terminan reforzando.

Siendo el colegio tipo 1 a estudiar la I.E. Ramón Copaja ubicado en el distrito de Tarata, provincia de Tarata; El colegio tipo 2 a estudiar la I.E. Ramón Castilla ubicado en la localidad de Chiluyo grande, distrito y provincia de Tarata; Y el tipo 3 a estudiar la I.E. Simón Bolívar ubicado en el centro poblado de Santa Cruz, distrito y provincia de Candarave; instituciones que se encuentran en la Región de Tacna y presentan planos Asbuilt.

Se hizo la visita de campo para realizar la verificación de los planos estructurales, corroborando la estructuración existente y corroborar las características del tipo de columnas, vigas existentes, resistencia del concreto, tipo de suelo coincidan con lo mencionado en los planos;

con la fluencia del acero que no pudo ser corroborada.

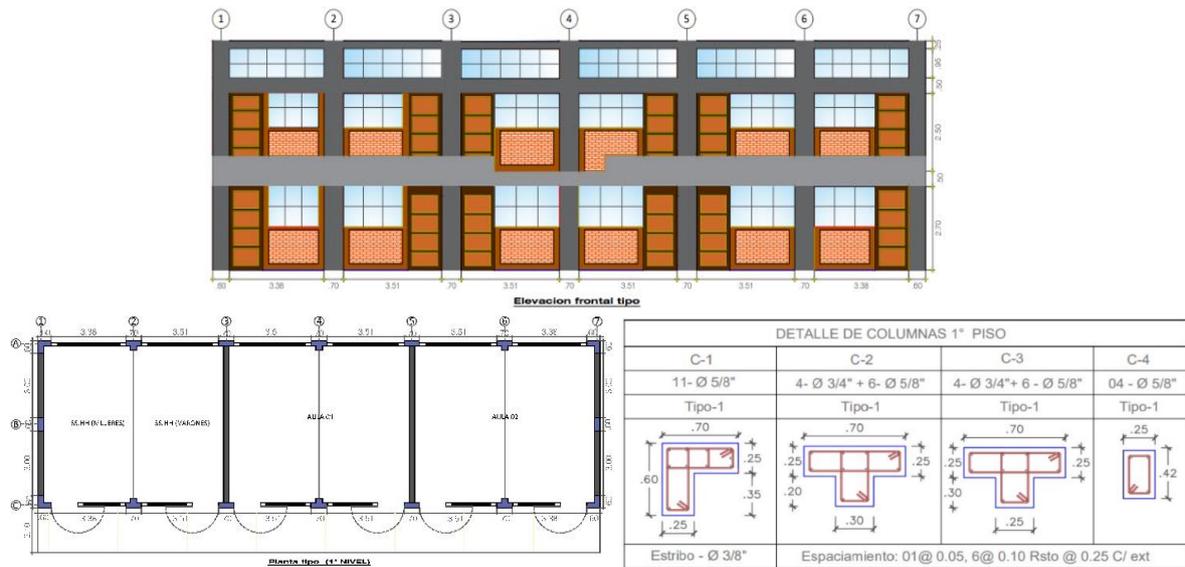


Figura 2. Vista en elevación, planta y detalles estructurales del centro educativo Ramón Copaja.

Fuente: Elaboración propia

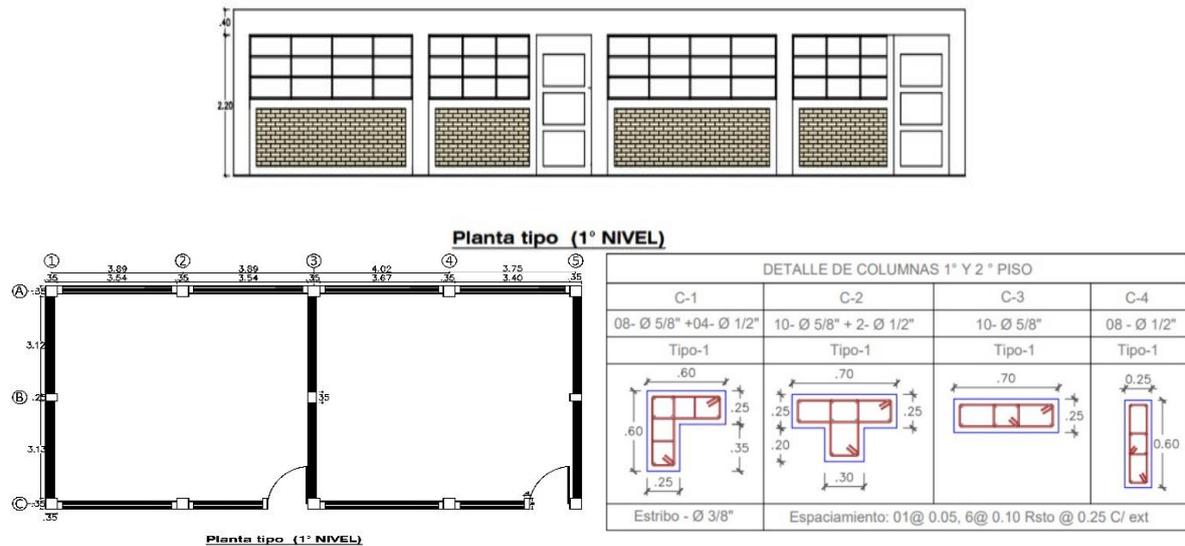


Figura 3. Vista en elevación, planta y detalles estructurales del centro educativo Ramón Castilla

Fuente: Elaboración propia

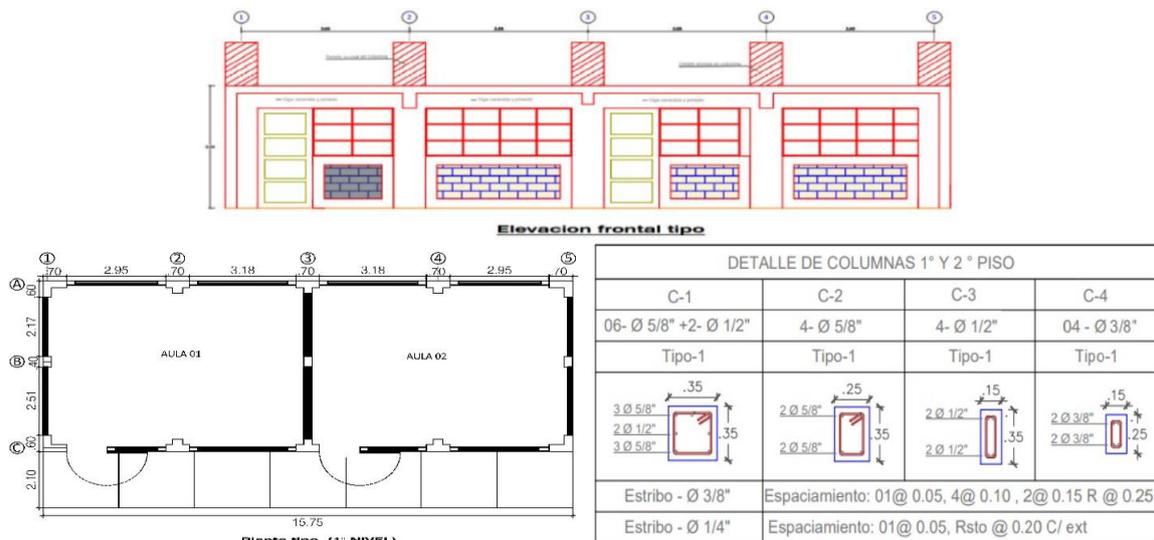


Figura 4. Vista en elevación, planta y detalles estructurales del centro educativo Simón Bolívar

Fuente: Elaboración propia

2.3. Descripción de los materiales:

Acero de refuerzo: El acero utilizado es del tipo ASTM-A615 con un $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$.

Concreto armado: En los 3 tipos de colegios los planos de entrega consideran un $f'_c 210 \text{ kg/cm}^2$, por ello en la I.E. Ramón Castilla y la I.E. Simón Bolívar consideramos el $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Pero en la I.E. Ramon Copaja se realizaron ensayos no destructivos con esclerómetro, obteniendo las siguientes resistencias promedios relativas de cada elemento estructural ver Tabla 1.

Muros de albañilería: Según diseño cuenta con una resistencia de $f'_m 45\text{kg/cm}^2$ con mortero de 1:5, con espesor máximo de 1.2cm – min 0.9cm. La Tabla 2 muestra las características y propiedades de los bloques utilizados.

Para los detalles de concreto y su correspondiente acero de refuerzo transversal y longitudinal, se toma como referencia los parámetros establecidos en el libro Building Code Requirements Available for Public Review (11).

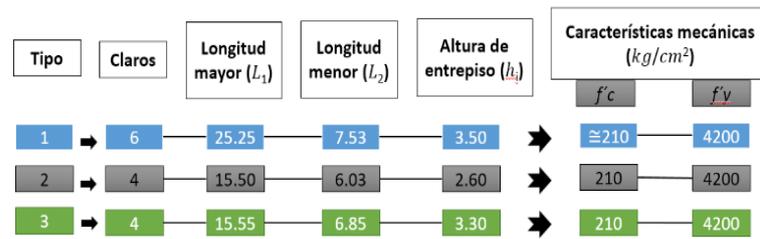


Figura 5. Organigrama de características de edificios tipo.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. Resistencias tomadas por esclerómetro I.E. Ramón Copaja

Columnas			Vigas		
Nomenclatura	Sección	fc-(kg/cm2)	Nomenclatura	Sección	fc-(kg/cm2)
Ensayo 01 - A	Columna L	253.1	Ensayo 02	Rectangular	270.7
Ensayo 01 - B		231	Ensayo 04	Rectangular	255.5
Ensayo 03	Columna T	201.8	Ensayo 06	Rectangular	264
Ensayo 05	Rectangular	364.7	Ensayo 08	Rectangular	270.9
Ensayo 07	Columna T	233.1	Ensayo 10	Rectangular	329
Ensayo 09	Rectangular	227.5	Ensayo 12	Rectangular	379.6
Ensayo 11	Columna T	251	Ensayo 14	Rectangular	365
Ensayo 13 -A	Columna L	221.4	Ensayo 16	Rectangular	253
Ensayo 13 -B		284.7	Ensayo 18	Rectangular	256.6
Ensayo 15	Rectangular	242.5	Ensayo 20	Rectangular	253.1
Ensayo 17 - A	Columna L	267.1	Ensayo 22	Rectangular	253.2
Ensayo 17 - B		197	Ensayo 24	Rectangular	273.5
Ensayo 19	Columna T	249.5	Ensayo 26	Rectangular	272.8
Ensayo 21	Rectangular	261.1	Ensayo 28	Rectangular	281.2
Ensayo 23	Columna T	186.3	Ensayo 30	Rectangular	281.2
Ensayo 25	Rectangular	379.7	Ensayo 32	Rectangular	253.1
Ensayo 27	Columna T	232	Ensayo 33	Rectangular	379.6
Ensayo 29-A	Columna L	260.1	Ensayo 34	Rectangular	352.2
Ensayo 29-B		260.1	Ensayo 35	Rectangular	379.6
Ensayo 31	Rectangular	246.1	Ensayo 36	Rectangular	351.5
			Ensayo 37	Rectangular	350.1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. *Características y propiedades de la albañilería en estudio según planos*

Tipo de ladrillo	Características del Tipo I (artesanal)		
f'_m	45 - 35	kgf/cm ²	Resistencia a la compresión del muro
ρ_t	0.00055		Cuantía longitudinal del muro
f_y	4200	kgf/cm ²	Resistencia a la fluencia del acero long.
ρ_{we}	0.0057		Cuantía transversal del muro
f_{wy}	4200	kgf/cm ²	Resistencia a la fluencia del acero transv.
σ_0	1.231	kgf/cm ²	Esfuerzo axial actuante

Fuente: Elaboración propia

2.4. Definir los componentes del análisis y elección del modelo matemático

Nuestro modelo matemático seleccionado es de tres dimensiones con múltiples grados de libertad y permiten establecer el comportamiento no lineal de la estructura para realizar un análisis post-elástico ante acciones dinámicas inducidas por sismos.

El modelamiento de los marcos de concreto armado (columnas y vigas) fueron definidos con elementos tipo “FRAME”. Con la regularidad de la estructura y el tipo de losa, al entre piso se asignó un diafragma rígido para limitar los efectos de torsión, y en la cobertura del segundo nivel se consideró diafragma no rígido debido a la cobertura con tijerales de madera que posee la edificación.

Para el análisis no lineal se utilizará el modelo histerético de respuesta cíclica tipo “TAKEDA” en los elementos tipo Frame, al no presentar mucha variación según los estudios de calibración realizados en la investigación Model for the Cyclic Response of Existing Reinforced Concrete Frames (11)

La albañilería confinada ha sido modelada a través de un marco equivalente, considerando un comportamiento no-lineal de elementos de plasticidad concentrada tipo “LINK - Multi-linear plástico”.

Para calcular el esfuerzo cortante medio se utilizó la siguiente fórmula (12):

$$[1] \quad \frac{\tau}{Fm} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{P_t \cdot \sigma_y}{Fm} \right) + \beta_2 \left(\frac{P_{we} \cdot \sigma_{wy}}{Fm} \right) + \beta_3 \left(\frac{\sigma_0}{Fm} \right)$$

La tabla 3 muestra los coeficientes de regresión multilineal que serán utilizadas en la ecuación [1]. La tabla 4, son deformaciones representativas expresadas en derivas agrupadas según ensayos experimentales. (12).

Tabla 3. *Coeficientes para cada estado límite según.*

Coeficiente	Cranking	Yielding	Maximum	Ultimate
β_0	0.00	0.00	0.00	0.00
β_1	0.00	0.00	0.054	0.221
β_2	0.249	0.426	0.432	0.077
β_3	0.221	0.175	0.29	0.503

Fuente: Diaz, et al, (12).

Tabla 4. *Derivas representativas para los tipos de ladrillo ($\times 10^{-3}$),*

Tipo de ladrillo	Cranking	Yielding	Maximum	Ultimate
Industrial	0.0006	0.0019	0.0076	0.0117
Artisanal	0.0004	0.0013	0.0035	0.008
Tubular	0.0004	0.0006	0.0019	0.0037

Fuente: Diaz, et al, (12).

A continuación, se muestra las características geométricas del muro en la tabla 5 obtenidos de los planos de cada institución.

Tabla 5. *Datos del muro en estudio obtenidas de los planos.*

Edificio	Espesor del muro (cm)	Longitud total del muro (cm)	Altura del muro (m)
Tipo 1	13	420	3.00
Tipo 2	13	320	3.00
Tipo 3	13	320	3.00

Fuente: Elaboración propia

Por último, la tabla 6 muestra los resultados que se obtiene con la fórmula [1], una vez

determinado el esfuerzo cortante medio; procedemos a calcular la fuerza V_m (kgf), que resulta de la multiplicación del esfuerzo cortante medio τ (kgf/cm²) por el espesor del muro y la longitud total del mismo.

Para determinar los desplazamientos utilizamos la Tabla 4 donde se brinda las derivas para cada tipo de muro, por lo que multiplicamos el valor de la distorsión por la altura de entre piso de cada edificación tipo en estudio.

Una vez obtenido la fuerza y los desplazamientos, procedemos a colocarlo en el Software SAP 2000, definiendo el Link en las propiedades de dirección /sentido.

Tabla 6. *Propiedades para la creación del muro de albañilería usando links (enlaces) en el software SAP 2000 (Fuerza-Desplazamiento)*

RAMON COPAJA					
Estado Límite	Esfuerzo	Distorsión	Fuerza		Desplazamiento
	τ (kgf/cm²)	Drift	V_m (kgf)	V_m (kN)	
Origin	0.000	0	0	0.00	0 cm
Cracking	6.212	0.0004	33918.31	339.18	0.12 cm
Yielding	10.378	0.0013	56664.10	566.64	0.39 cm
Maximum	10.965	0.0035	59869.92	598.70	1.05 cm
Ultimate	8.772	0.008	47895.94	478.96	2.4 cm
RAMON CASTILLA					
Estado Límite	Esfuerzo	Distorsión	Fuerza		Desplazamiento
	τ (kgf/cm²)	Drift	V_m (kgf)	V_m (kN)	
Origin	0.000	0	0	0.00	0 cm
Cracking	6.158	0.0004	25616.22	256.16	0.12 cm
Yielding	10.335	0.0013	42993.45	429.93	0.39 cm
Maximum	10.914	0.0035	45400.62	454.01	1.05 cm
Ultimate	8.731	0.008	36320.49	363.20	2.4 cm
SIMON BOLIVAR					
Estado Límite	Esfuerzo	Distorsión	Fuerza		Desplazamiento
	τ (kgf/cm²)	Drift	V_m (kgf)	V_m (kN)	
Origin	0.000	0	0	0.00	0 cm
Cracking	6.158	0.0004	25616.22	256.16	0.12 cm
Yielding	10.335	0.0013	42993.45	429.93	0.39 cm
Maximum	10.914	0.0035	45400.62	454.01	1.05 cm
Ultimate	8.731	0.008	36320.49	363.20	2.4 cm

Fuente: Elaboración propia

2.5. Cargas empleadas en la modelación

Las cargas empleadas en los modelos, fueron seleccionados conforme a los detalles que indican los planos y también los expuestos en el reglamento nacional de edificaciones E020, (13). A continuación, se detallan las cargas muertas y vivas consideradas para el modelo:

Carga Viva para centros educativos= 250 kgf/m²

Muros= 263 kgf/m²

Losa aligerada= 300 kgf/m²

Tijerales, techos= 100 kgf/m²

Concreto armado= 2400 kgf/m³

2.6. Combinación de cargas para el análisis dinámico no lineal

Según reglamento NTP E030 (5), por lo general la carga gravitacional a utilizar es igual a la carga muerta de servicio y una fracción de la carga viva. En la CM debe incluirse el peso de los elementos estructurales y no estructurales.

Así mismo la investigación de Alas & Grijalva (8) aconseja utilizar la combinación de carga:

$$[2] \quad 1.0 \text{ CM} + 0.50 \text{ CV}$$

3. DEMANDA SÍSMICA Y SELECCIÓN DE REGISTROS ACELEROGRÁFICOS

3.1. Redes acelerográficas en el Perú

En la actualidad existe 4 redes acelerográficas en el Perú y estas son: (14)

Red de acelerómetros del IGP: Integrada por 168 estaciones distribuidas por el Perú.

Red acelerográfica CISMID – UNI: Actualmente cuenta con 37 acelerógrafos instalados en Lima, Tacna, Arequipa, Moquegua y Cusco.

Red acelerográfica SENCICO: Firmo un convenio con la UNI y gracias a eso, actualmente cuenta con 10 acelerógrafos y 4 por instalar.

Red acelerográfica UNI-CIP: Actualmente alcanza un total de 69 acelerógrafos operativos.

El instrumental de la red aceleográfica se viene instalando en universidades y conse-

jos departamentales del colegio de ingenieros del Perú, va permitiendo generar información de acelerogramas de distribución y uso abierto, lo cual contribuirá al desarrollo de investigaciones orientadas al uso de las normas E030 y E050.

3.2. Selección de registros acelerográficos

El presente estudio se enfoca en el sur del Perú, específicamente en la región de Tacna utilizando los registros que brindan las 10 estaciones existentes entre los departamentos de Arequipa, Moquegua, Puno y Tacna. Tomando en cuenta a lo mencionado, se obtuvo el registro de los sismos más representativos ocurridos por la zona.

Para la presente investigación se utilizaron 8 registros de 7 redes acelerográficas, cada uno con sus 2 componentes ortogonales de aceleraciones como indica el RNE E030 (5) siendo consistentes con el estudio de mecánica de suelos del sitio.

Tabla 7. Serie de 7 eventos sísmicos utilizados para el estudio

Fecha de evento sísmico	Red Acelerografica	Estación	Código del evento	Prof (km)	Latitud	Longitud	Aceleración Máxima (cm/s ²)	Magnitud
Junio 23, 2001	CISMID - UNI	Cesar Vizcarras Vargas	MOQ001-01	33	-16.08	-73.77	-301.15	6.9 mb
Julio 07, 2001	CISMID - UNI	Jorge Basadre university	TAC001-01	33	-17.4	-71.67	40.42	6.5 mb
		Estación UNSA	AQP001-01	33	-17.4	-71.67	-123.21	6.5 mb
Agosto 15, 2007	CISMID - UNI	Estación Characato	AQP002-07	40	-13.67	-76.76	9.63	7.0 ML
Mayo 05, 2010	CISMID - UNI	Alberto Giesecke Matto	TAC002-10	36	-18.34	-71.17	104	6.5 ML
Mayo 14, 2012	CISMID - UNI	Alberto Giesecke Matto	TAC002-12	98	-18.005	-70.226	180	6.1 ML

Abril 01, 2014	CISMID - UNI	Jorge Basa- dre univer- sity	TAC001- 14	38.9	-19.57	-70.91	72.49	8.2 Mw
Marzo 02, 2015	CISMID - UNI	SENCICO Tacna	TAC004- 15	125	-17.99	-70.238	43.10	6.2 ML

Fuente: Elaboración propia

3.3. Ajuste de los espectros de respuesta

Para realizar los análisis, el espectro debe ser compatible con un espectro elástico de respuesta que represente las acciones sísmicas del sitio; siendo el espectro elástico el definido por la Norma E030 (5) utilizando el coeficiente de reducción sísmica y gravedad igual a 1.

La tabla siguiente muestra los valores que se utilizan en la elaboración del espectro. Se utilizó el software SeismoMatch v18 para ajustar los espectros de diseño en estudio al espectro elástico objetivo.

Tabla 8. Valores utilizados conforme a lo indicado en la NTP E030

DATOS	FACTO- RES	DATOS	DIR X-X	DIR Y-Y
Z	0.45	RO	1	1
U	1.50	Ia	1.00	1.00
S	1.05	Ip	1.00	1.00
TP	0.60	R	8	3
TL	2.00	g	1 m/s ²	

Fuente: Elaboración propia

La tabla siguiente muestra los periodos y sus valores utilizados para el escalado de los registros.

Tabla 9. Periodos obtenidos en cada sentido y para cada IE.

I.E.	Orien.	Periodo	0.2T (min)	1.5T (máx.)
RAMON	TX	0.1951	0.03902	0.29265
COPAJA	TY	0.2485	0.0497	0.37275

SIMON BO-	TX	0.141	0.0282	0.2115
LIVAR	TY	0.167	0.0334	0.2505
RAMON	TX	0.0993	0.01986	0.14895
CASTILLA	TY	0.1161	0.02322	0.17415

Fuente: Elaboración propia

A continuación, en la Figura 6 y 7 se presentan los gráficos de los espectros de respuesta de aceleración para las dos componentes ortogonales de cada uno de los 8 registros seleccionados en el estudio utilizando los periodos de vibración de la institución educativa Tipo 01.

Los valores de aceleraciones espectrales se presentan en términos de “g” donde g representa el valor de la gravedad (9.81 m/s²). (15)

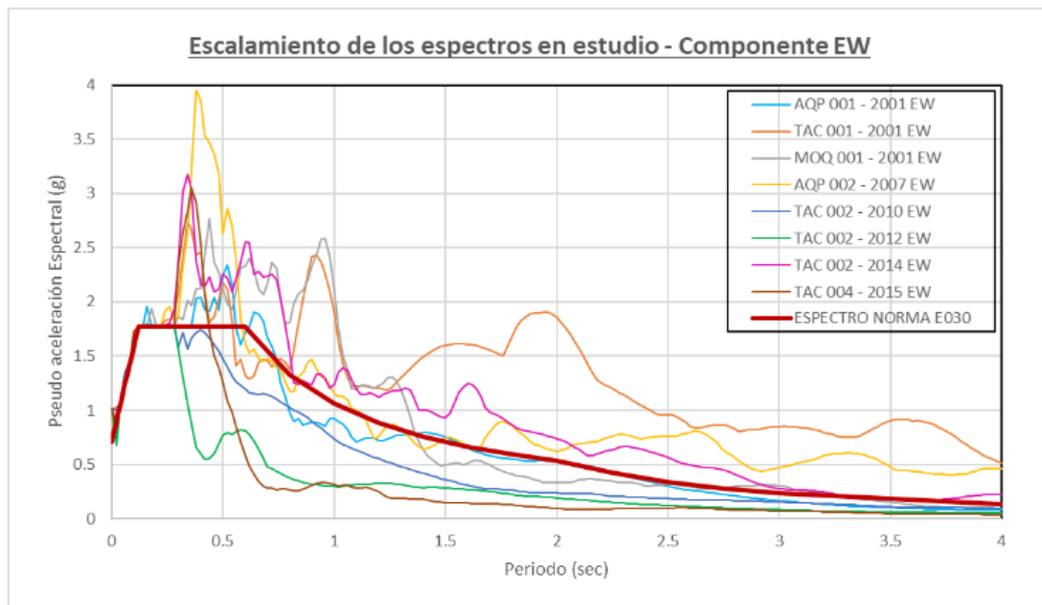


Figura 6. E. R. de los sismos en el eje X-X.

Fuente: Elaboración propia

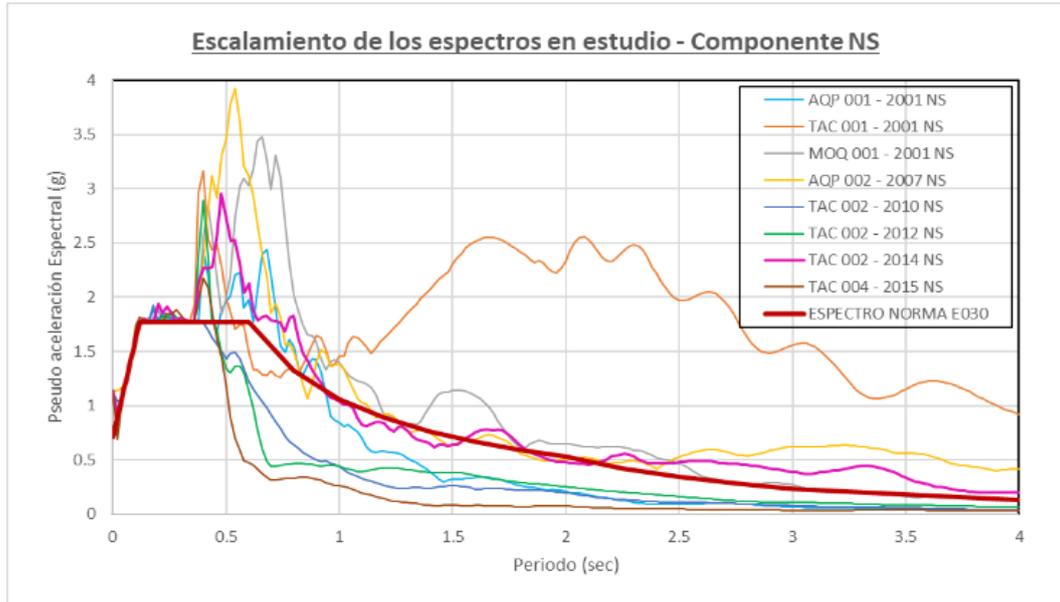


Figura 7. E. R. de los sismos en el eje Y-Y.

Fuente: Elaboración propia

3.4. Procesamiento de los registros acelerográficos para el análisis

Para la ejecución de los análisis se procedió a fijar la duración significativa de los registros que se utilizaran en el análisis, con ayuda del software digital Seismosignal v18, (16). La “duración significativa del sismo” es la duración del evento sísmico con la máxima energía del movimiento, y queda representado por el tiempo transcurrido entre los instantes en los que se alcanza el 5% y el 95% del valor de la intensidad de Arias o la intensidad sísmica instrumental.

$$[3] \quad I_a = \frac{\pi}{2g} \int [a(t)^2] dt$$

Donde:

- I_a es la intensidad de Arias, en unidades de
- $a(t)$ es la aceleración del suelo en función del tiempo.

Como referencia de lo realizado, se muestra el proceso de reducción para las 2 componentes del evento sísmico de junio del 2001, registrado en la ciudad de Moquegua por la red del Cismid-UNI; en la figura 4 y figura 5 se detalla se evento sísmico en sus direcciones Este-Oeste (EW) y Norte-Sur (NS), el cual tiene una duración de 137.96 segundos.

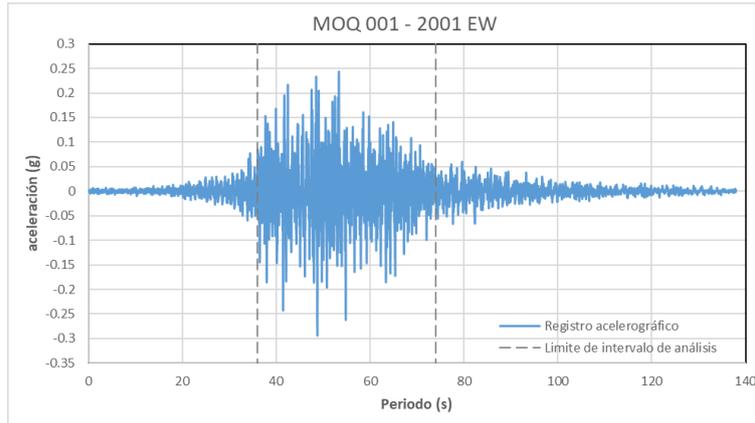


Figura 8. R. A. del evento sísmico del 23 de junio del 2001 , dirección EW (Moquegua-Perú, red Cismid-UNI).

Fuente: Elaboración propia

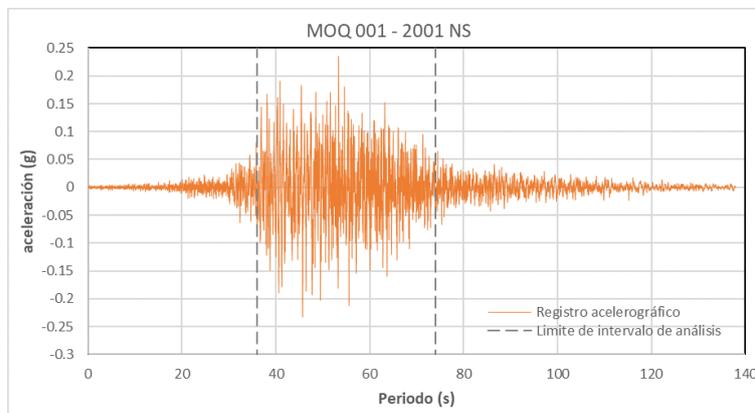


Figura 9. R. A. del evento sísmico del 23 de junio del 2001 , dirección NS (Moquegua-Perú, red Cismid-UNI).

Fuente: Elaboración propia

Para mostrar la duración significativa del sismo, se emplea los gráficos de “Husid”, es un gráfico de valores porcentuales acumulados que indican la cantidad de energía liberada por el sismo (17). En la figura 7 y 8 se visualizan los resultados de la evaluación y duración significativa para los registros considerados anteriormente para las direcciones EW y NS.

Para el sismo en la dirección EW el intervalo donde ocurre la duración significativa del registro oscila entre los 37.00 – 74.00 segundos; mientras que, para la dirección NS, oscila entre 36.00 – 74.00 segundos. Se usó una envolvente conservadora de modo que las aceleraciones en ambas direcciones exhiban el mismo punto inicial y final, continuando con el ejemplo, los registros de ambas direcciones fueron recortados para un intervalo que va desde los 36 hasta los 74 segundos.

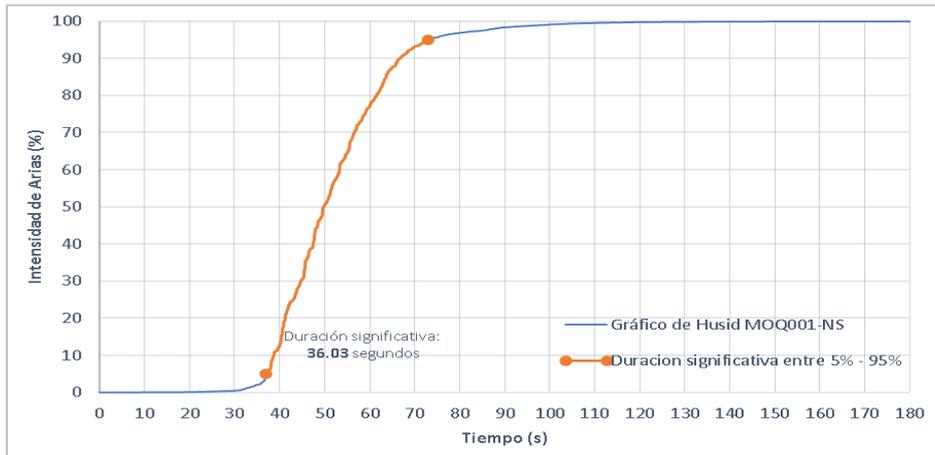


Figura 10. Gráfico de “Husid” muestra la duración del sismo de junio del 2001 en Moquegua-Perú, red Cismid-UNI, dirección Este-Oeste (EW).

Fuente: Elaboración propia

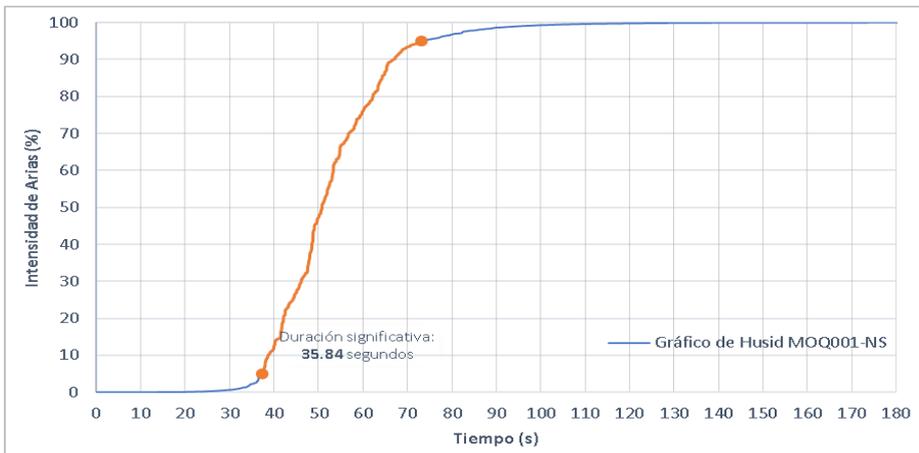


Figura 11. Gráfico de “Husid” muestra la duración del sismo de junio del 2001 en Moquegua-Perú, red Cismid-UNI, dirección Norte-Sur (NS).

Fuente: Elaboración propia

La figura 12 y figura 13, muestran los registros acelerográficos recortados de la duración significativa en ambas direcciones del evento sísmico de junio del 2001 registrado en Moquegua por la red del Cismid-UNI.

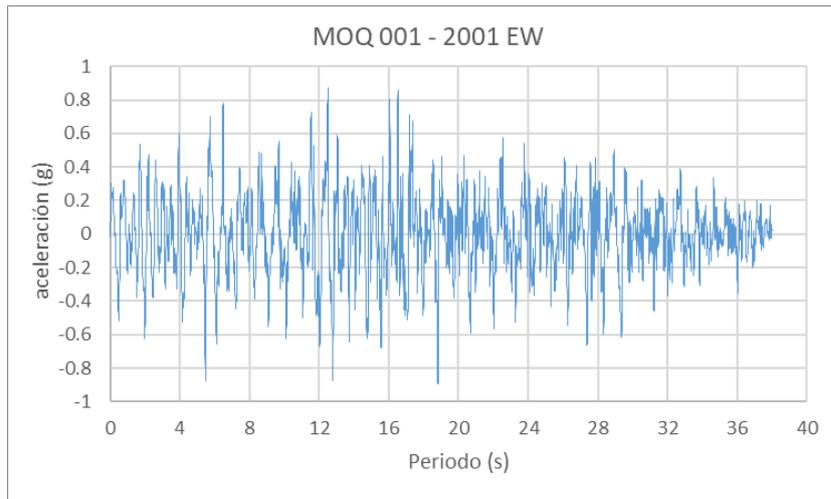


Figura 12. Registro acelerográfico con los recortes de la duración significativa para el evento sísmico de junio del 2001 en Moquegua-Perú, red Cismis-UNI, dirección Este-Oeste (EW)

Fuente: Elaboración propia

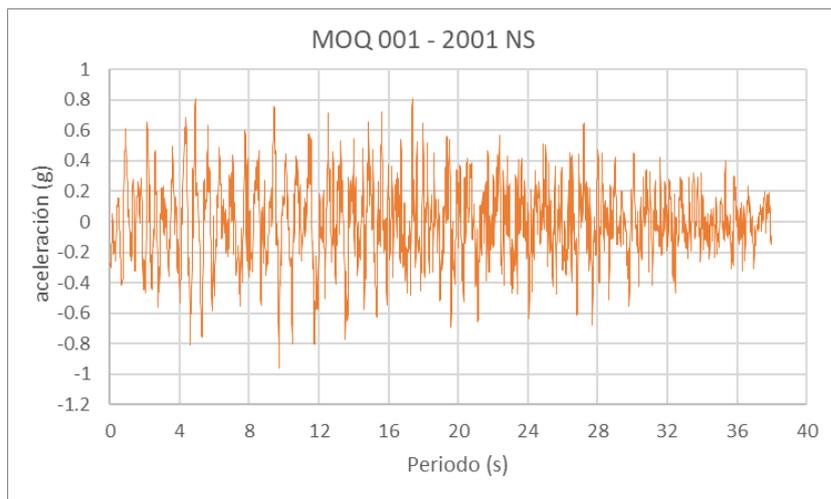


Figura 13. Registro acelerográfico con los recortes de la duración significativa para el evento sísmico de junio del 2001 en Moquegua-Perú, red Cismis-UNI, dirección Norte-Sur (NS)

Fuente: Elaboración propia

La tabla 10 muestra un resumen de los resultados obtenidos del proceso realizado para los ocho eventos sísmicos considerados para la investigación, cada una de las componentes de cada registro, en cada dirección y en el intervalo que abarca desde el 5% hasta el 95% de la Intensidad de Arias.

Tabla 10. Duraciones consideradas según lo indicado para cada registro sísmico

Evento Sísmico	registro	tiempo del registro	tiempo significativo	intervalo de análisis	tiempo de análisis
AQP001 - 2001	Este - Oeste	137.96	24.00 – 66.00	18.00 –	50.00
	Norte - Sur	137.96	18.00 – 68.00	68.00	
TAC001 - 2001	Este - Oeste	128.67	2.00 - 55.50	1.50 - 55.50	54.00
	Norte - Sur	128.67	1.50 – 47.00		
MOQ001 - 2001	Este - Oeste	199.00	37.00 - 74.00	36.00 –	38.00
	Norte - Sur	199.00	36.00 - 74.00	74.00	
AQP002 - 2007	Este - Oeste	157.00	20.00 – 115.00	20.00 –	95.00
	Norte - Sur	157.00	23.00 – 115.00	115.00	
TAC002 - 2010	Este - Oeste	127.00	23.00 – 43.00	23.00 –	20.00
	Norte - Sur	127.00	25.00 – 42.00	43.00	
TAC002 - 2012	Este - Oeste	110.00	24.00 – 34.00	16.00 –	22.00
	Norte - Sur	110.00	16.00 – 38.00	38.00	
TAC002 - 2014	Este - Oeste	160.00	40.00 – 96.00	37.00 –	59.00
	Norte - Sur	160.00	37.00 – 95.00	96.00	
TAC004 - 2015	Este - Oeste	309.99	25.00 – 59.00	25.00 –	34.00
	Norte - Sur	309.99	25.00 – 57.5	59.00	

Fuente: Elaboración propia

4. CURVAS DE CAPACIDAD

Para definir los estados de daño midiéndolo desde la zona del rango inelástico, en el rango comprendido entre el nivel elástico y los valores de colapso. El cuadro 2 presenta el estado límite de colapso (C) entre el máximo y el colapso, la prevención del colapso (CP) entre máximo y el valor de prevención de colapso, la seguridad vital (LS) entre el valor de prevención de colapso y valor no lineal de deterioro considerable, rango de ocupación (IO) entre el valor no lineal y elástico. En la figura siguiente se puede ver el umbral de las normas de diseño sísmico NTP-030 (5) para edificios de mampostería. Este valor es un umbral que divide el estado de reparación del edificio con el estado de colapso o de prevención de colapso del edificio.

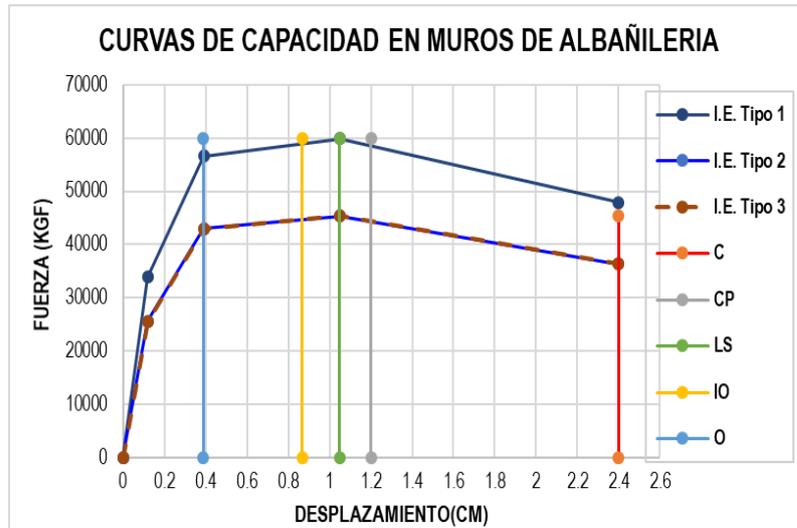


Figura 14. Estados de daño en las curvas de capacidad

Fuente: Elaboración propia

5. ANÁLISIS DINAMICO NO LINEAL

Como se menciona anteriormente, se cuenta con registros reales a fin de obtener la respuesta sísmica inelástica de las estructuras y determinar la fragilidad que posee cada estructura; usando de forma parcial el análisis dinámico incremental, sometemos los modelos a un análisis no lineal tiempo historia bajo una serie de acelerogramas los que han sido escalados de forma creciente para cada intensidad hasta que se alcanza el colapso. (18).

Se utiliza como parámetro indicador al desplazamiento, para la evaluación de la fragilidad sísmica en estudio. El análisis ha sido efectuado en el SAP2000 v24, tomando los siguientes criterios detallados:

Se emplea escalas de 50%, 75%, 100%, 125% y 200% del evento sísmico empleado, valores que permitirán llevar a la estructura a un estado límite de colapso.

El análisis considero el efecto de cada componente sobre la estructura de forma simultánea, asignando a la dirección débil el sismo que recibiera mayor valor de la aceleración espectral, aquella que se dispone únicamente por 1 solo marco de luz corta.

Los resultados obtenidos mediante el análisis dinámico no lineal, buscan relacionar el desplazamiento máximo en un punto de control en la estructura versus el evento sísmico. Para el resultado de la presente investigación, se toma los máximos desplazamientos según cada sismo.

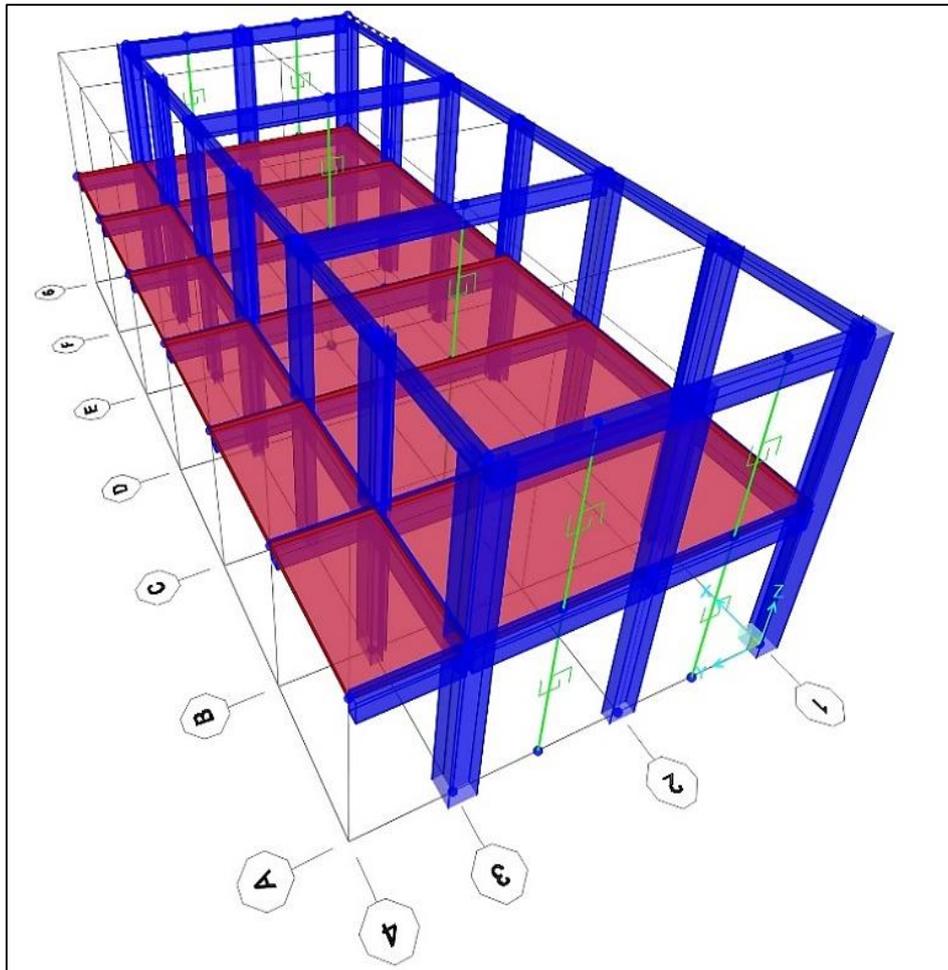


Figura 15. Modelo de edificio índice tipo 1

Fuente: Elaboración propia

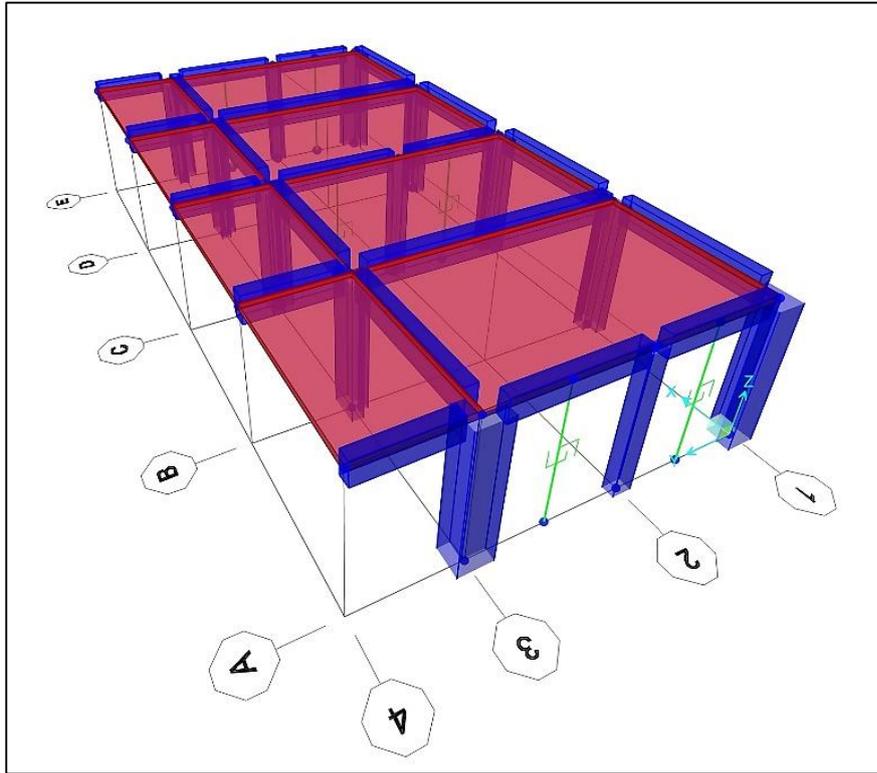


Figura 16. Modelo de edificio índice tipo 2

Fuente: Elaboración propia

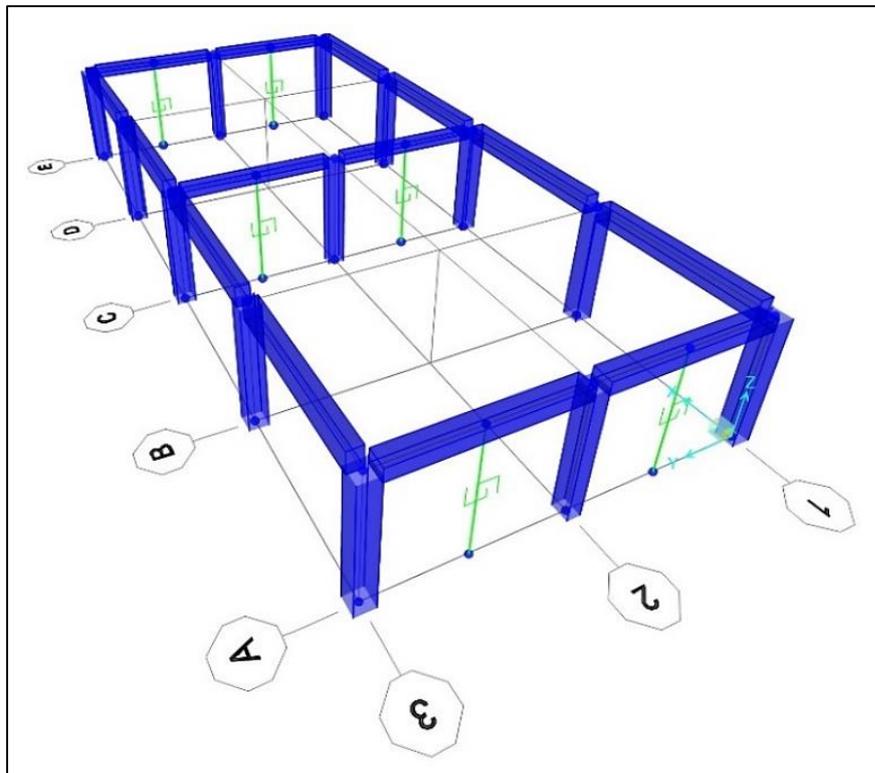


Figura 17. Modelo de edificio índice tipo 3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11. Resultados de los desplazamientos máximos

Sismo	Escala	Desplazamiento Máximo (mm)					
		Tipo 1		Tipo 2		Tipo 3	
		E-W	N-S	E-W	N-S	E-W	N-S
MOQ-001	50%	8.6	1.1	2.2	0.1	6.5	1.3
AQP-001	50%	7.9	0.4	1.8	0.09	5	1.1
AQP-002	50%	6.6	0.6	2	0.13	4.5	0.7
TAC-001	50%	8.2	0.7	1.4	0.1	6.4	1.07
TAC-002-2010	50%	7.6	0.6	1.7	0.1	4.5	1.04
TAC-002-2012	50%	8.3	0.8	2.3	0.09	4.6	1.2
TAC-002-2014	50%	7.2	0.7	2	0.11	4.7	1.08
TAC-004-2015	50%	10.4	0.3	2.1	0.02	6	0.4
MOQ-001	75%	12.9	1.5	3.3	0.3	9.8	2.07
AQP-001	75%	11.9	0.7	2.8	0.1	7.5	1.4
AQP-002	75%	9.9	0.9	3.1	0.2	6.8	1.11
TAC-001	75%	12.3	1.0	2.1	0.2	9.6	1.7
TAC-002-2010	75%	11.4	0.9	2.6	0.17	6.8	1.47
TAC-002-2012	75%	12.4	1.2	3.4	0.13	6.9	1.67
TAC-002-2014	75%	10.8	1.0	3	0.17	7.1	1.69
TAC-004-2015	75%	15.5	0.4	3.2	0.04	9	0.6
MOQ-001	100%	17.2	1.9	4.4	0.4	13	2.84
AQP-001	100%	15.9	0.9	3.7	0.2	9.9	1.78
AQP-002	100%	13.2	1.0	4.1	0.3	9.1	1.44
TAC-001	100%	16.3	1.2	2.9	0.3	12.6	2.68
TAC-002-2010	100%	15.2	1.2	3.5	0.2	9.1	1.89
TAC-002-2012	100%	16.6	1.5	4.6	0.17	9.2	2.24
TAC-002-2014	100%	14.4	1.4	4	0.23	9.5	2.41
TAC-004-2015	100%	20.6	0.5	4.3	0.05	12.1	0.80
MOQ-001	125%	21.5	2.5	5.5	0.5	16.3	4.13
AQP-001	125%	19.8	1.1	4.7	0.23	12.3	2.25
AQP-002	125%	16.6	1.4	5.2	0.4	11.3	2.42
TAC-001	125%	20.2	1.6	3.6	0.36	15.6	3.9
TAC-002-2010	125%	19.6	1.4	4.3	0.3	11.4	2.68
TAC-002-2012	125%	20.8	1.6	5.8	0.22	11.6	2.87
TAC-002-2014	125%	17.8	1.8	5	0.28	11.9	3.22
TAC-004-2015	125%	25.5	0.6	5.4	0.06	15.1	1.02
MOQ-001	200%	39.9	4.5	8.6	0.7	23.3	9.3
AQP-001	200%	27.9	2.4	8	0.4	19	6.09
AQP-002	200%	33	3.8	9.3	0.6	18.46	7.3

TAC-001	200%	30.4	3.7	7	0.6	18.23	8.26
TAC-002-2010	200%	31.5	2.7	5.8	0.5	24	7.92
TAC-002-2012	200%	26.2	2.2	8.3	0.35	17.74	5.62
TAC-002-2014	200%	31.3	3.3	7.5	0.45	19.08	7.54
TAC-004-2015	200%	34.1	0.8	8.7	0.1	25.9	1.84

Fuente: Elaboración propia

6. CURVAS DE FRAGILIDAD

La metodología utilizada combina investigaciones de campo y pruebas experimentales con análisis estructurales no lineales, representando mediante un gráfico la relación de probabilidad de daño en función a una intensidad asociada a una demanda sísmica, la cual para el presente estudio es la aceleración espectral del primer y segundo modo de vibración de la estructura.

Se ha aplicado a un caso de estudio que consiste en un edificio escolar de hormigón armado existente para analizar y comparar los índices propuestos con respecto a diferentes procedimientos de selección de movimiento del suelo (19).

Además, también se ha realizado una comparación detallada con índices de vulnerabilidad alternativos de la literatura revisada a continuación:

6.1. Curvas de fragilidad con estados de daño según Hazus Mr4

La probabilidad de exceder o no un estado de daño será modelado como una distribución logarítmica normal.

Para daños estructurales, teniendo el desplazamiento, la probabilidad exceder un estado de daño, se modela con la formula brindada (20):

$$[4] \quad P[d \geq D] = 1 - \frac{1}{2} \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{\ln\left(\frac{D}{\mu}\right)}{(\beta \sqrt{2})} \right) \right]$$

Dónde:

$P[d \geq D]$

Probabilidad de parámetros de demanda

- erf Es la función de error de Gauss.
- μ Es el valor medio de una intensidad de movimiento del suelo.
- β Es la desviación estándar del logaritmo natural del índice de movimiento del suelo (estado de daño).

El valor medio se calcula por regresión exponencial del gráfico Desplazamiento–PGA y los umbrales de daños:

Tabla 12. Parámetro de daño según Hazus

Estados límites	Parámetros daño (%)
Ligero	0.2
Moderado	0.39
Extensivo	1.06
Completo	2.74

Fuente: Elaboración propia

Se realizó un estudio paramétrico utilizando los ocho movimientos de tierra previamente seleccionados. Cada movimiento de tierra se escaló varias veces para producir un rango de aceleraciones espectrales. Las aceleraciones espectrales impuestas fueron 0.5g, 0.75g, 1g, 1.25g y 2g. Se realizaron un total de 120 análisis escalados es decir 40 para cada tipología. Se necesitaron aproximadamente 120 horas de tiempo de análisis para realizar a las 3 tipologías sin contar el tiempo de desarrollo del modelamiento y el tiempo de adquisición de resultados.

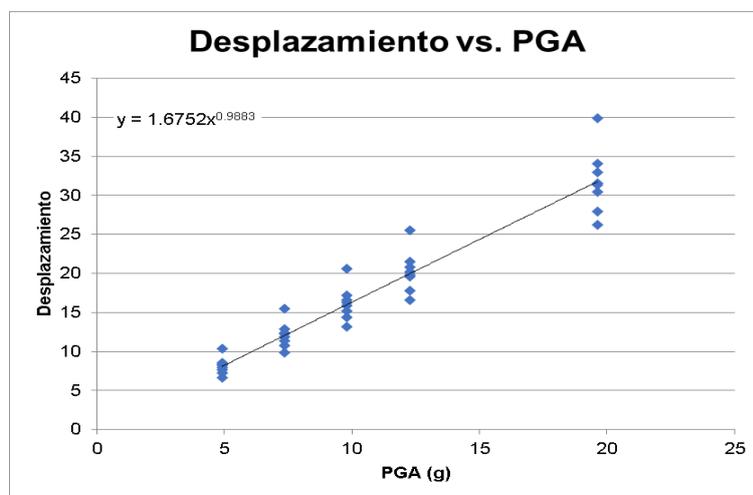


Figura 18. Modelo de edificio Tipo 1

Fuente: Elaboración propia

Obtenidos los valores con las fórmulas anteriormente mencionadas procedemos a tabular y buscar los índices de probabilidad de daño con las derivas previamente obtenidas mediante el análisis con el SAP2000 las colocamos en las hojas de cálculo de nombre FFG: Fragility Function Generator (21), de la Universidad de Toledo, logrando así graficar las Curvas de Fragilidad para las 3 tipologías en estudio.

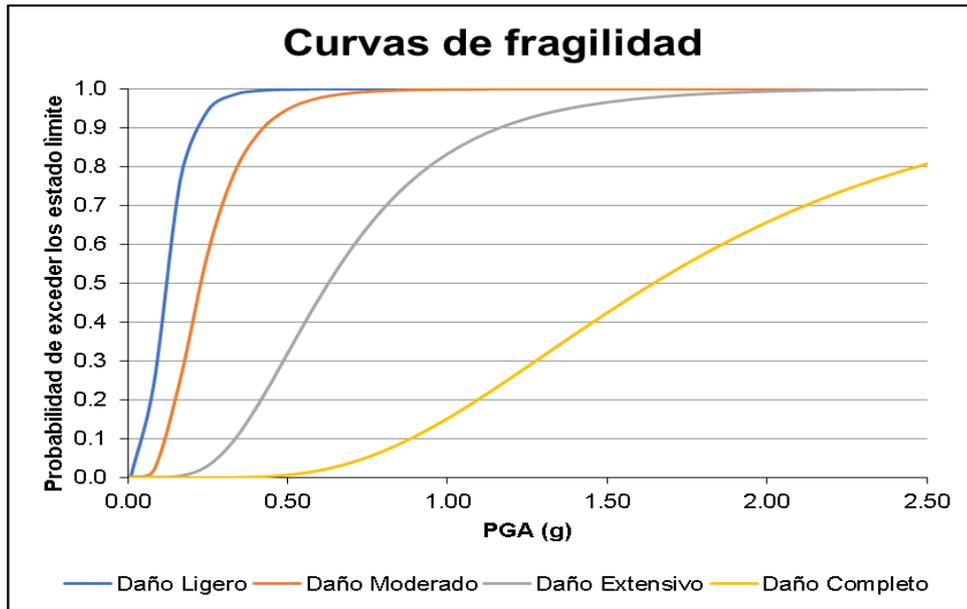


Figura 19. Curva de fragilidad del Modelo de edificio Tipo 1 obtenida con Macro de hoja de cálculo (21).

Fuente: Elaboración propia

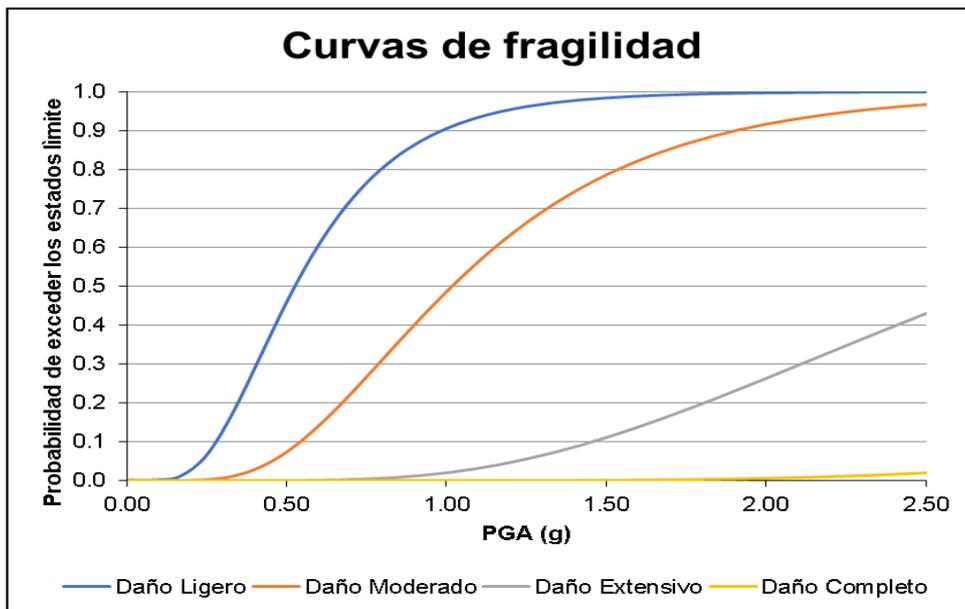


Figura 20. Curva de fragilidad del Modelo de edificio Tipo 2 obtenida con Macro de hoja de cálculo (21).

Fuente: Elaboración propia

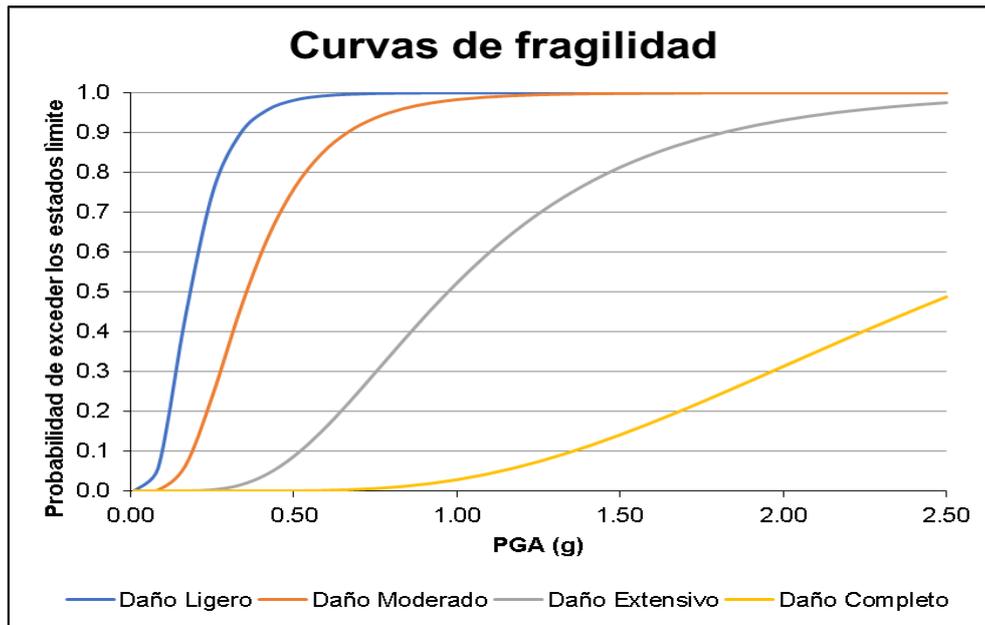


Figura 21. Curva de fragilidad del Modelo de edificio Tipo 3 obtenida con Macro de hoja de cálculo (21).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 13. Resultados de los porcentajes de daño e índice de daño global esperado por cada sismo

PGA (%)	Fragilidad para los estados de daño según Hazus											
	Tipología 1				Tipología 2				Tipología 3			
	Ligero	Mode-rado	Extensivo	Com-pleto	Ligero	Mode-rado	Exten-sivo	Com-pleto	Ligero	Mode-rado	Exten-sivo	Com-pleto
	0.2 (%)	0.39 (%)	1.06 (%)	2.74 (%)	0.2 (%)	0.39 (%)	1.06 (%)	2.74 (%)	0.2 (%)	0.39 (%)	1.06 (%)	2.74 (%)
0.01	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.08	24.47%	1.84%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	5.79%	0.16%	0.00%	0.00%
0.17	77.09%	25.61%	0.30%	0.00%	0.92%	0.01%	0.00%	0.00%	43.69%	6.22%	0.02%	0.00%
0.25	94.30%	57.26%	2.81%	0.00%	6.34%	0.20%	0.00%	0.00%	74.80%	23.89%	0.28%	0.00%
0.33	98.52%	78.17%	9.44%	0.05%	17.40%	1.12%	0.00%	0.00%	89.53%	45.11%	1.44%	0.00%
0.42	99.58%	89.24%	19.69%	0.23%	31.49%	3.38%	0.01%	0.00%	95.64%	63.01%	4.17%	0.01%
0.50	99.87%	94.70%	31.71%	0.69%	45.66%	7.28%	0.03%	0.00%	98.13%	75.93%	8.71%	0.05%
0.58	99.96%	97.35%	43.76%	1.60%	58.17%	12.72%	0.08%	0.00%	99.17%	84.58%	14.81%	0.13%
0.67	99.98%	98.65%	54.74%	3.09%	68.42%	19.31%	0.20%	0.00%	99.62%	90.16%	22.00%	0.32%
0.75	99.99%	99.29%	64.16%	5.22%	76.44%	26.58%	0.41%	0.00%	99.82%	93.71%	29.74%	0.64%
0.83	100.00%	99.62%	71.92%	7.98%	82.54%	34.09%	0.76%	0.00%	99.91%	95.96%	37.56%	1.14%
0.92	100.00%	99.79%	78.16%	11.33%	87.10%	41.49%	1.29%	0.00%	99.95%	97.38%	45.12%	1.87%

1.00	100.00%	99.89%	83.08%	15.17%	90.48%	48.52%	2.01%	0.00%	99.98%	98.29%	52.19%	2.84%
1.08	100.00%	99.93%	86.93%	19.38%	92.96%	55.04%	2.95%	0.01%	99.99%	98.87%	58.64%	4.08%
1.17	100.00%	99.96%	89.91%	23.87%	94.79%	60.96%	4.12%	0.01%	99.99%	99.25%	64.41%	5.59%
1.25	100.00%	99.98%	92.20%	28.50%	96.13%	66.26%	5.52%	0.02%	100.00%	99.50%	69.50%	7.36%
1.33	100.00%	99.99%	93.97%	33.19%	97.11%	70.94%	7.16%	0.04%	100.00%	99.66%	73.95%	9.38%
1.42	100.00%	99.99%	95.33%	37.86%	97.84%	75.03%	9.01%	0.06%	100.00%	99.77%	77.80%	11.62%
1.50	100.00%	99.99%	96.37%	42.43%	98.38%	78.60%	11.07%	0.09%	100.00%	99.84%	81.11%	14.06%
1.58	100.00%	100.00%	97.18%	46.84%	98.78%	81.68%	13.30%	0.12%	100.00%	99.89%	83.95%	16.67%
1.67	100.00%	100.00%	97.80%	51.07%	99.07%	84.33%	15.69%	0.17%	100.00%	99.92%	86.37%	19.42%
1.75	100.00%	100.00%	98.28%	55.08%	99.29%	86.60%	18.21%	0.24%	100.00%	99.94%	88.42%	22.27%
1.83	100.00%	100.00%	98.65%	58.86%	99.46%	88.55%	20.83%	0.32%	100.00%	99.96%	90.17%	25.20%
1.92	100.00%	100.00%	98.94%	62.39%	99.59%	90.22%	23.53%	0.42%	100.00%	99.97%	91.65%	28.18%
2.00	100.00%	100.00%	99.16%	65.68%	99.68%	91.64%	26.29%	0.54%	100.00%	99.98%	92.91%	31.18%

Fuente: Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

Esta investigación desarrolla una metodología que permite determinar la respuesta sísmica de los centros educativos tipo en estudio de la región de Tacna, permitiendo representarla mediante funciones de fragilidad analíticas, cuyos resultados fueron obtenidos por un análisis dinámico incremental a la estructura.

Como menciona la norma E030, se seleccionaron 8 pares de registros acelerográficos los que fueron descargados de REDACIS; y que fueron ajustados al espectro de la norma E030 con el programa SeismoMatch V16, y también reduciendo el tiempo de duración la cual toma la intensidad de arias entre el 5% al 95% del total de la energía liberada.

Con los sismos estudiados, la estructura tiene una probabilidad de exceder los estados límite, en el modelo tipo 2 un daño completo de 0.54% sin presentar daños, también se puede observar que solo tendría un daño ligero del 99.68% y moderado del 91.64% siendo este un daño considerable.

Se infiere que los desplazamientos obtenidos del edificio tipo 1 son los de mayor magnitud, las que llegan a una probabilidad de exceder el estado límite de daño completo de un 65.68% para un escalado del 200% de la gravedad.

Para la componente E-W, tomando en consideración un PGA de 0.50g, las curvas de fragilidad reportadas para el edificio tipo 1, tipo 2 y tipo 3. Muestran una probabilidad de excedencia del 99.87%, 45,66% y 98.13% periódicamente según su tipología de obtener un daño ligero. Para la componente E-W, tomando en consideración un PGA de 0.50g, las curvas de fragilidad reportadas para el edificio tipo 1, tipo 2 y tipo 3. Muestran una probabilidad de excedencia del 0.69%, 0.00% y 0.05% periódicamente según su tipología de obtener un daño completo.

Para la componente E-W, tomando en consideración un PGA de 2.00 g, las curvas de fragilidad reportadas para el edificio tipo 1, tipo 2 y tipo 3. Muestran una probabilidad de excedencia del 100%, 99.68% y 100% periódicamente según su tipología de obtener un daño ligero. Para la componente E-W, tomando en consideración un PGA de 2.00 g, las curvas de fragilidad reportadas para el edificio tipo 1, tipo 2 y tipo 3. Muestran una probabilidad de excedencia del 65.68%, 0.54% y 31.18% periódicamente según su tipología de obtener un daño completo.

Evaluando un escenario utilizando el mismo procedimiento anterior en el cual tomemos el valor medio de todas las respuestas obtenidas por los espectros considerados que representara la amenaza que sufrirá la estructura; podemos concluir que en caso de ocurrido un evento con las características representadas por la mediana; la estructura tendría una fragilidad sísmica cercana al daño Completo para el tipo 1, Extensivo para el tipo 3 y Moderado para el tipo 2, según los estados de daño del método Hazus como se visualizó en la Figura 19, 20, 21 y la Tabla 13.

Se concluyó que la estructura posee una fragilidad sísmica Moderado, pudiendo presentar grietas en vigas, columnas del concreto no confinado ante la ocurrencia de los eventos sísmicos en estudio intensificados en un 200% del tipo 2, teniendo un desplazamiento de 9.3 mm.

También se concluye que la estructura posee una fragilidad sísmica completa, pudiendo presentar grietas en vigas, columnas irreparables del concreto no confinado ante la ocurrencia de los eventos sísmicos en estudio intensificados en un 200% del tipo 1, teniendo un desplazamiento de 39.9 mm siendo este el mayor.

Los resultados de las curvas de fragilidad nos indican que ante un registro sísmico intensificado en un 200% la I.E. tipo 2 presenta el menor daño y el Tipo 1 es el que presenta mayor daño de las tipologías estudiadas.

8. RECOMENDACIONES

Siendo un estudio muy variado y amplio, no se realizó el análisis no lineal con los valores de los elementos no estructurales, por lo que se recomienda completar los estudios en posteriores investigaciones, incrementando más tipologías en el análisis y ampliar el catálogo de registros que representen la amenaza sísmica.

Debido a la poca cantidad de registros sísmicos peruanos y que solo se encuentran sismos de moderada y baja intensidad, se recurrió a escalar a partir de los registros sísmicos reales. Para posteriores estudios se recomienda ampliar las funciones de fragilidad que permitan estimar las pérdidas económicas y humanas ante un posible colapso global de la estructura.

En general se pudo apreciar que la estructura tuvo un comportamiento esperado variable como se puede apreciar en las figuras 19, 20 y 21 siendo sometidas a 8 diferentes sismos con una escala de 50%, 75%, 100%, 125% y 200%, los resultados mostraron que ciertos puntos en la edificación pueden ser reparados y algunos no, siendo este un nuevo tema de estudio.

Teniendo acceso a los planos físicos, se observó y comprobó que existen variaciones en los datos de los elementos estructurales (Planos As Built).

Se recomienda en futuros estudios mejorar el modelamiento y análisis añadiendo los elementos no estructurales.

REFERENCIAS / REFERENCES

- (1) Alayo, L. (2006). Cronología histórica de los terremotos más destructivos en le Perú. 1533-2007. 10. Recuperado de https://www.preventionweb.net/files/16782_historiadelerremotosenelperu.pdf
- (2) Tavera, H. (2014). Evaluación Del Peligro Asociado a Los Sismos Y Efectos Secundarios En Perú. In Instituto Geofísico del Perú (Vol. 11704). Recuperado de <https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2019/01/fil20140926131431.pdf>
- (3) Tavera, H. (2021). Columna de Opinión: Perú, un país altamente sísmico - Gobierno del Perú. Recuperado Diciembre 3, 2021, de IGP website: <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/547999-columna-de-opinion-peru-un-pais-altamente-sismico>
- (4) INDECI. (2020). Compendio Estadístico 2020. 2020, 63. Recuperado de <https://www.indeci.gob.pe/wp-content/uploads/2021/02/CAPITULO-I-Presentación-Normas-GRD.pdf>
- (5) Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2020). Norma técnica E.030 Diseño sismorresistente. Retrieved from https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/299950/d289856_opt.pdf
- (6) D'Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., & Silva, V. (2015). Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment of Low/Mid-Rise Buildings, Vulnerability Global Component Project. In GEM Technical Report 2015-08 v1.0.0 (Vol. 08).
- (7) Kiremidjian, A., & Singhal, A. (1995). Method for Developing Motion Damage Relationships for Reinforced Concrete Frames. Recuperado de <https://ubir.buffalo.edu/xmlui/handle/10477/747>
- (8) Alas Fernández, R. E., & Grijalva Portal, S. O. (2018). Evaluación de la Vulnerabilidad Sísmica, por medio de curvas de fragilidad, utilizando el análisis dinámico no lineal incremental. 1–37.
- (9) UGEL-Tacna. (2020). UGEL Tacna. Recuperado Setiembre 5, 2022, de <https://www.ugeltacna.gob.pe/>
- (10) DRET. (2021). :::Dirección Regional de Educación Tacna:::. Recuperado Setiembre 5, 2022, de: <http://www.educaciontacna.edu.pe/web/>

- (11) Son, J., & Lee, C.-H. (2020). 기존 철근콘크리트 골조의 반복거동 예측을 위한 이력모델 - Hysteresis Model for the Cyclic Response of Existing Reinforced Concrete Frames. 20(3), 81–89.
- (12) Diaz, M., Zavala, C., Flores, E., & Cardenas, L. (2019). Development of analytical models for confined masonry walls based on experimental results in Lima city. *Tecnia*, 29(2), 23–29. <https://doi.org/10.21754/tecnica.v29i2.711>
- (13) Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento. (2016). Norma Técnica E020, Cargas.
- (14) UNI. (n.d.). Red Acelerográfica. Recuperado Diciembre 3, 2021, de website: <http://www.red-acelerografica-peru.uni.edu.pe/es/page/history>
- (15) Kassem, M. M., Mohamed Nazri, F., Noroozinejad Farsangi, E., & Tan, C. G. (2021). Comparative seismic RISK assessment of existing RC buildings using seismic vulnerability index approach. *Structures*, 32(December 2020), 889–913. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.03.032>
- (16) Seismosignal. (2021). SeismoSignal - Signal Processing of Strong-Motion data - Seismosoft. Recuperado Diciembre 13, 2021, de Seismosoft website: <https://seismosoft.com/products/seismosignal/>
- (17) Carreño, E., Bravo, B., Suárez, A., & Tordesillas, J. M. (1999). Registro y Tratamiento de Acelerogramas. *Física de La Tierra*, 81–111.
- (18) Vamvatsikos, D., & Allin Cornell, C. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 491–514. <https://doi.org/10.1002/eqe.141>
- (19) Marasco, S., Noori, A. Z., Domaneschi, M., & Cimellaro, G. P. (2021). Seismic vulnerability assessment indices for buildings: Proposals, comparisons and methodologies at collapse limit states. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 63(July), 102466. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102466>
- (20) FEMA, McCormack, T. L. H., Cottier, M., Anshari, N., Harkrisnowo, H., Rusman, R., ... Crimes, W. (2020). HAZUS MR4.
- (21) Gandage, S., Salgado, R., & Guner, S. (2019). FFG: Fragility Function Generator. FFG: Fragility Function Generator. Recuperado de <https://www.utoledo.edu/engineering/faculty/serhan-guner/Publications.html>

ANEXOS

Anexo A. Fichas de recolección de datos para ensayos de esclerometría (Ver fichas completas en PDF adjunto)

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA RELATIVA DEL CONCRETO EMPLEANDO EL ESCLERÓMETRO COMO INSTRUMENTO PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS

Elaborado por: Darwin Danilo Vallejos Consa, David Sullca Ataco, Luis Fernando Mamani Catunta
 Nombre de la institución: I.E. RAYON COPAJA



INFORMACION GENERAL	FECHA: <u>06/10/21</u> HORA: <u>15:25</u> TEMPERATURA: <u>15°C</u> CLIMA: <u>SOBLADO</u>
CARACTERÍSTICAS DE ESCLEROMETRO:	NORMAS:
Producto: Concrete Test Hammer	<input type="radio"/> ASTM C 805,1997 - Estándar test Method for rebound number of hardened concrete.
Modelo: HT225 - N	<input checked="" type="radio"/> NTP 339.181; 2013 - Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido
Serial N°: N20090007	<input type="radio"/> UNE-EN-12504-2 - Ensayos de hormigon en estructuras
Fecha de producción: 23.09.2020	<input type="radio"/> MTC e 725 - Método de ensayo para determinar el numero de rebotes del concreto endurecido.

PROCEDIMIENTO	NOTA: Este ensayo no sustituye al ensayo de compresion como metodo para determinar la resistencia del concreto
- Ubicar y seleccionar una zona de ensayo de aproximadamente 15 x 15 cm. (El elemento debe tener un espesor minimo de 100mm) - La superficie debe de estar lisa y sin recubrir (preparar la zona efectuandose el pulido especial haciendo uso la piedra abrasiva). - Dibujar la cuadrícula de líneas distanciadas a 1" y tomar la interseccion de ellas como punto de impacto. - Eliminar el indice de rebote más bajo y más alto, promediar los rebotes restantes y obtenido el promedio ubicarlo en el abaco del esclerometro.	

ENSAYO N° <u>01-A</u> <u>Columna</u>							
ORDEN DE MENOR A MAYOR DEL INDICE DE REBOTE: <u>31.9</u> <u>32</u> <u>32</u> <u>32</u> <u>33</u> <u>33.9</u> <u>33.9</u> <u>34.4</u> <u>36</u> <u>38.9</u>							
Elemento	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área (cm ²)	f'c (kg/cm ²)	Diseño		
<input checked="" type="radio"/> Columna	<u>60</u>	<u>25</u>	<u>2375</u>	<u>210</u>			
<input type="radio"/> Viga							
N° de toma	N° de disparos	Indice de rebote	Promedio	Mediana	f'c (N/mm ²)	f'c (Kg/cm ²) Promedio	Variacion con la mediana
1	1	36			4/mm ²		NO
2	1	38.9			25.5	260	NO
3	1	32					NO
4	1	33					NO
5	1	34.4	33.8	33.5	Kg/cm ²		NO
6	1	32			320	320	NO
7	1	31.9			PSI		NO
8	1	32					NO
9	1	33.9			3600	253.1	NO
10	1	33.9					NO

ENSAYO N° <u>01-B</u> <u>Columna</u>							
ORDEN DE MENOR A MAYOR DEL INDICE DE REBOTE: <u>28.5</u> <u>29.9</u> <u>30</u> <u>30</u> <u>30.9</u> <u>30.9</u> <u>32</u> <u>33</u> <u>36.5</u> <u>37</u>							
Elemento	Largo (cm)	Ancho (cm)	Área (cm ²)	f'c (kg/cm ²)	Diseño		
<input checked="" type="radio"/> Columna	<u>60</u>	<u>25</u>	<u>2375</u>	<u>210</u>			
<input type="radio"/> Viga							
N° de toma	N° de disparos	Indice de rebote	Promedio	Mediana	f'c (N/mm ²)	f'c (Kg/cm ²) Promedio	Valor que difiere de la mediana
1	1	30			4/mm ²		NO
2	1	36.5			22.5	229.4	NO
3	1	37					SI
4	1	30					NO
5	1	32	31.3	30.7	Kg/cm ²		NO
6	1	30.9			280	280	NO
7	1	29.9			PSI		NO
8	1	33					NO
9	1	30.5			3300	231	NO
10	1	28.5					NO

I.E. RAYON COPAJA-TARATA
 DIRECCIÓN
 TARA, TACNA
 Prof. Juan Anco Mamani
 DIRECTOR

Anexo B . Planos (Para visualizar todos, ver PDF adjunto)

