

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

**ESCUELA DE POSGRADO**



**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**TESIS:**

**EFFECTO DE RÉPLICAS SÍSMICAS SOBRE LAS DERIVAS E ÍNDICE  
DE DAÑO EN LA I.E. N°82030 FERNADEZ GIL EN LA LOCALIDAD  
DE PARIAMARCA, CAJAMARCA 2022**

Para optar el Grado Académico de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

**MENCIÓN: INGENIERÍA CIVIL**

Presentada por:

**Bachiller: EMERSSON SAMUEL AGUILAR HUAMÁN**

Asesor:

**Dr. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO**

Cajamarca, Perú

**2022**

COPYRIGHT © 2022 by  
**EMERSSON SAMUEL AGUILAR HUAMÁN**  
Todos los derechos reservados

# **UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**

## **ESCUELA DE POSGRADO**



### **UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA**

### **PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

### **TESIS APROBADA:**

### **EFFECTO DE RÉPLICAS SÍSMICAS SOBRE LAS DERIVAS E ÍNDICE DE DAÑO EN LA I.E. N°82030 FERNANDEZ GIL EN LA LOCALIDAD DE PARIAMARCA, CAJAMARCA 2022**

Para optar el Grado Académico de  
**MAESTRO EN CIENCIAS**  
**MENCIÓN: INGENIERÍA CIVIL**

Presentada por:  
**Bachiller: EMERSSON SAMUEL AGUILAR HUAMÁN**

### **JURADO EVALUADOR**

Dr. Miguel Angel Mosqueira Moreno  
Asesor

M.Cs. Mauro Augusto Centurión Vargas  
Jurado evaluador

M.Cs. Arnold Ramsey Mendo Rodríguez  
Jurado evaluador

M.Cs. José Luis Marchena Araujo  
Jurado evaluador

**Cajamarca, Perú**

**2022**



**Universidad Nacional de Cajamarca**  
LICENCIADA CON RESOLUCIÓN DE CONSEJO DIRECTIVO N° 090-2018-SUNEDU/CD

**Escuela de Posgrado**  
CAJAMARCA - PERU



**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS**

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS**

Siendo las 17:00 horas, del día 17 de noviembre del dos mil veintidós, reunidos en el Auditorio de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, el Jurado Evaluador presidido por el **M.Cs. MAURO AUGUSTO CENTURIÓN VARGAS**, **M.Cs. JOSÉ LUIS MARCHENA ARAUJO**, **M.Cs. ARNOLD RAMSEY MENDO RODRÍGUEZ**, y en calidad de Asesor el **Dr. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO**. Actuando de conformidad con el Reglamento Interno y el Reglamento de Tesis de Maestría de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional de Cajamarca, se dio inicio a la Sustentación de la Tesis titulada **“EFECTOS DE RÉPLICAS SÍSMICAS SOBRE LAS DERIVAS E ÍNDICE DE DAÑO EN LA LE N° 82030 FERNÁNDEZ GIL EN LA LOCALIDAD DE PARIAMARCA, CAJAMARCA 2022”**, presentada por el **Bach. en Ingeniería Civil EMERSSON SAMUEL AGUILAR HUAMÁN**.

Realizada la exposición de la Tesis y absueltas las preguntas formuladas por el Jurado Evaluador, y luego de la deliberación, se acordó Aprobado con la calificación de Excelente diecisiete (17) la mencionada Tesis; en tal virtud, el **Bach. en Ingeniería Civil EMERSSON SAMUEL AGUILAR HUAMÁN**, está apto para recibir en ceremonia especial el Diploma que lo acredita como **MAESTRO EN CIENCIAS**, de la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería, con Mención en **INGENIERÍA CIVIL**.

Siendo las 18:40 horas del mismo día, se dio por concluido el acto.

.....  
**Dr. Miguel Angel Mosqueira Moreno**  
Asesor

.....  
**M.Cs. Mauro Augusto Centurión Vargas**  
Jurado Evaluador

.....  
**M.Cs. Arnold Ramsey Mendo Rodríguez**  
Jurado Evaluador

.....  
**M.Cs. José Luis Marchena Araujo**  
Jurado Evaluador

A mi familia, especialmente a mis padres y mi hermano. Gracias por todo.  
A mis colegas y jugadores del equipo de fútbol Milkers por nuestra sincera amistad.

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional de Cajamarca, mi asesor, jurados, amigos y colegas.

“Acabado el sueño del diagnóstico favorable  
del muerto que anda”  
2013

## INDICE GENERAL

### CAPÍTULO I

<b>1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Planteamiento del problema .....	1
1.1.1 Contextualización.....	1
1.1.2 Descripción del problema.....	2
1.1.3 Formulación del problema.....	5
1.2 Justificación e importancia .....	5
1.3 Delimitación de la investigación .....	6
1.4 Limitaciones.....	7
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos .....	7

### CAPÍTULO II

<b>2 MARCO TEORICO.....</b>	<b>8</b>
2.1 Antecedentes de la investigación o marco referencial.....	8
2.2 Marco doctrinal de las teorías particulares en el campo de la ciencia en la que se ubica el objeto de estudio (Bases teóricas).....	11
2.2.1 Sismicidad En Perú.....	11
2.2.2 Sismos.....	14
2.2.3 Análisis no lineal tiempo historia .....	22
2.2.4 Espectros de respuesta .....	23
2.2.5 Modificación de registros sísmicos.....	30
2.2.6 Propiedades no lineales de los materiales .....	37
2.3 Marco conceptual.....	50
2.3.1 Espectro de respuesta y espectro objetivo.....	50
2.3.2 Análisis Tiempo Historia.....	50
2.3.3 Derivas de entrepiso .....	51
2.3.4 Índice de Daño.....	52
2.4 Definición de términos básicos.....	52

### CAPÍTULO III

<b>3 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS Y VARIABLES .....</b>	<b>54</b>
3.1 Hipótesis.....	54
3.1.1 Hipótesis general .....	54



3.2 Variables o categorías .....	54
3.3 Operacionalización de los componentes de la hipótesis .....	54

## **CAPÍTULO IV**

<b>4 MARCO METODOLÓGICO.....</b>	<b>56</b>
4.1.1 Ubicación geográfica .....	56
4.2 Diseño de la investigación .....	57
4.2.1 Propiedades mecánicas de los materiales .....	57
4.2.2 Selección de registros sísmicos .....	62
4.2.3 Intervalo de tiempo mínimo entre el sismo principal y su respectiva réplica. ....	69
4.2.4 Rango de periodos para el ajuste espectral y escalamiento de amplitudes.....	71
4.2.5 Espectro objetivo .....	71
4.2.6 Escalamiento .....	73
4.2.7 Ajuste espectral de registros sísmicos .....	76
4.2.8 Definición del modelo matemático en PERFORM 3D .....	79
4.2.9 Cálculo de derivas de entrepiso .....	82
4.2.10 Estimación del índice de daño .....	83
4.3 Métodos de investigación.....	84
4.4 Población, muestra, unidad de análisis y unidades de observación .....	85
4.5 Técnicas e instrumentos de recopilación de información .....	85
4.6 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información .....	85
4.7 Matriz de consistencia metodológica.....	85

## **CAPÍTULO V**

<b>5 RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>	<b>87</b>
5.1 Presentación de resultados.....	87
5.1.1 Estimación de derivas y desplazamientos .....	87
5.1.2 Estimación del Índice de daño en la edificación .....	94
5.2 Análisis, interpretación y discusión de resultados .....	97
5.2.1 Derivas y desplazamientos .....	97
5.2.2 Índice de daño .....	102
5.2.3 Variables que influyen en el análisis sísmico. ....	103
5.3 Contratación de hipótesis.....	106
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>107</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>109</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>115</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultado de ensayo de esclerometría en columnas. Ver anexo 1.....	58
Tabla 2. Resultado de ensayo de esclerometría en vigas. Ver anexo 1.....	58
Tabla 3. Esquema y distribución de acero en vigas. Ver anexo 2.....	59
Tabla 4. Esquema y distribución de acero en columnas. Ver anexo 2.....	61
Tabla 5. Principales propiedades de la institución educativa para el modelo estructural .....	62
Tabla 6. Registros sísmicos seleccionados para el procedimiento de escalamiento...	65
Tabla 7. Registros sísmicos seleccionados para el procedimiento de ajuste espectral... .....	65
Tabla 8. Periodos de vibración de la estructura modelada .....	70
Tabla 9. Intervalo de tiempo calculado entre sismo y réplica (ajuste espectral) .....	70
Tabla 10. Intervalo de tiempo calculado entre sismo y réplica (escalamiento de amplitudes) .....	71
Tabla 11. Evaluación de periodos de señales sísmicas en Cajamarca para identificar el tipo de suelo predominante. ....	72
Tabla 12. Parámetros para la construcción del espectro inelástico. ....	73
Tabla 13. Derivas calculadas para los registros sísmicos con y sin réplicas con el método de escalamiento.....	88
Tabla 14. Derivas calculadas para los registros sísmicos con y sin réplicas con el método de ajuste espectral.....	91
Tabla 15. Resumen de derivas calculadas para los registros sísmicos escalados ....	98
Tabla 16. Resumen de derivas calculadas para los registros sísmicos ajustados espectralmente .....	99

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Configuración típica de instituciones educativas .....	3
Figura 2. Mecanismos de sismicidad en el Perú. ....	11
Figura 3. Sismicidad histórica en el Perú. ....	13
Figura 4. Puntos importantes en la ocurrencia de un sismo .....	15
Figura 5. Ondas de cuerpo.....	16
Figura 6. Comparación entre escalas para medir un sismo.....	17
Figura 7. Sismograma típico .....	18
Figura 8. Ejemplo de acelerograma sin corregir y corregido.....	20
Figura 9. Representación esquemática de la fase de réplicas del terremoto de Nepal y clasificación de las réplicas.....	22
Figura 10. Espectro de respuesta de código de construcción suavizado: Formato tripartito. ....	24
Figura 11. Espectro de respuesta de código de construcción suavizado: Formato ADRS. ....	25
Figura 12. Zonificación sísmica de la norma técnica E.030 del Perú.....	26
Figura 13. Máxima aceleración sísmica según zonificación .....	27
Figura 14. Factores de uso según categoría de la edificación.....	27
Figura 15. Factor de suelo “S”.....	28
Figura 16. Periodos $T_p$ y $T_L$ .....	28
Figura 17. Valores para el factor de reducción de fuerzas sísmicas.....	29
Figura 18. Ejemplo de ajuste espectral de un registro sísmico.....	36
Figura 19. Comparación en la serie de amplitudes entre el registro inicial y el registro ajustado espectralmente.....	37
Figura 20. Curva de esfuerzo deformación según el modelo de Kent y Park (1971) ..	38
Figura 21. Curva de esfuerzo deformación según el modelo de Shein y Uzumeri (1971) .....	39
Figura 22. Comparación de curvas esfuerzo - formación de un concreto simple y uno confinado .....	40
Figura 23. Modelo de respuesta bilineal para una columna de concreto armado .....	41
Figura 24. Modelo de degradación trilineal.....	42

Figura 25. Modelo de histéresis de Takeda con degradación.....	44
Figura 26. Esquema de modelo de plasticidad concentrada .....	45
Figura 27. Envoltente de backbone para un modelo trilineal. ....	45
Figura 28. Relación fuerza deformación.....	46
Figura 29. Esquema de compresión de muros de albañilería a lo largo de la dirección diagonal. ....	47
Figura 30. Modelo trilineal de fuerza desplazamiento.....	50
Figura 31. Representación de deriva de entrepiso .....	51
Figura 32. Ubicación espacial de la edificación a estudiar.....	56
Figura 33. Ubicación de la edificación a estudiar. ....	57
Figura 34. Esquema de vigas y columnas donde se aplicó el método de esclerometría. Ver anexo 1. ....	58
Figura 35. Ubicación de sismos seleccionados .....	64
Figura 36. Ilustración del intervalo de tiempo entre un sismo principal y su réplica. ....	70
Figura 37. Periodo fundamental del estrato, según el tipo de suelo. ....	72
Figura 38. Espectro de respuesta objetivo construido con los parámetros de la Tabla 06. ....	73
Figura 39. Espectros de pseudoaceleraciones de los registros sísmicos antes de ser escalados. ....	74
Figura 40. Espectros de pseudoaceleraciones de los registros sísmicos luego de ser escalados .....	74
Figura 41. Sismos escalados con sus respectivas réplicas empleados en el análisis. ....	75
Figura 42. Espectros de los registros sísmicos antes de ser ajustados espectralmente. ....	76
Figura 43. Espectros de los registros sísmicos luego del procedimiento de ajuste espectral. ....	77
Figura 44. Sismos ajustados espectralmente con sus respectivas réplicas. ....	78
Figura 45. Modelo estructural de la edificación en Perform 3D. ....	79
Figura 46. Modelo trilineal para análisis inelástico de una columna de concreto armado construido en Perform 3D. ....	80
Figura 47. Modelo trilineal para análisis inelástico de una viga de concreto armado ..	81

Figura 48. Modelo no lineal de muro de albañilería definido como diagonal equivalente. ....	82
Figura 49. Muestra de máximo desplazamiento alcanzado durante la ejecución de análisis no lineal tiempo – historia para la estructura en estudio. ....	83
Figura 50. Comportamiento histerético de una columna sometida a un sismo con réplica. ....	83
Figura 51. Energía histerética disipada para un sismo con réplica .....	84
Figura 52. Series de desplazamientos obtenidos para sismo único y sismo con réplica, registro sísmico Arequipa - 2001 .....	87
Figura 53. Desplazamientos máximos de entrepiso calculados para los registros sísmicos usando el método de escalamiento. ....	89
Figura 54. Derivas máximas de entrepiso calculadas para los registros sísmicos usando el método de escalamiento.....	90
Figura 55. Desplazamientos máximos de entrepiso calculados para los registros sísmicos usando el método de ajuste espectral. ....	92
Figura 56. Derivas máximas de entrepiso calculadas para los registros sísmicos usando el método de ajuste espectral.....	92
.....	92
Figura 57. Comparación entre respuesta promedio de desplazamientos entre los resultados de los registros sísmicos escalados y los registros ajustados espectralmente. ....	93
Figura 58. Comparación entre respuesta promedio de derivas entre los resultados de los registros sísmicos escalados y los registros ajustados espectralmente.....	94
Figura 59. Índice de daño calculado para los registros sísmicos escalados. ....	95
Figura 60. Índice de daño promedio calculado para los sismos escalados.....	95
Figura 61. Índice de daño calculado para los registros sísmicos ajustados espectralmente. ....	96
Figura 62. Índice de daño promedio calculado para los registros sísmicos ajustados espectralmente .....	96
Figura 63. Comparación entre el índice de daño promedio calculado para los registros sísmicos escalados y los registros ajustados espectralmente.....	97
Figura 64. Efectos de réplicas sísmicas sobre desplazamientos .....	100
Figura 65. Efectos de réplicas sísmicas sobre desplazamientos de un edificio de concreto armado.....	101
Figura 66. Efectos de réplicas sísmicas sobre energía disipada .....	102

## LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

<b>ASCE</b>	: American Society of Civil Engineers (Sociedad Americana de Ingenieros Civiles).
<b>IGP</b>	: Instituto Geofísico del Perú.
<b>FEMA</b>	: Federal Emergency Management Agency (Agencia Federal para el Manejo de Emergencias).
<b>MI</b>	: Magnitud local.
<b>Mw</b>	: Magnitud de momento.
<b>MINEDU</b>	: Ministerio de Educación.
<b>SENCICO</b>	: Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción.

## RESUMEN

Las edificaciones escolares del distrito de Cajamarca están ubicadas en zona de peligro sísmico. Asimismo, es natural que cuando ocurre un sismo, este viene seguido de una o más réplicas. No obstante, el estudio de los efectos de un sismo sobre una estructura por lo general se realiza considerando solo el sismo principal. El objetivo de esta investigación es determinar la influencia de réplicas sísmicas sobre las derivas e índice de daño de una edificación escolar ubicada en el distrito de Cajamarca. Con este fin, se realizó un modelo matemático de la estructura usando datos de esclerometría y caracterizando las propiedades no lineales de los elementos estructurales. Se emplearon catorce registros sísmicos, tanto sismos principales como sus réplicas, los cuales se han compatibilizado con el peligro sísmico local usando las metodologías de escalamiento y ajuste espectral, luego se realizó el análisis no lineal tiempo historia en el programa Perform 3D. Los resultados muestran que al incluir réplicas sísmicas en el cálculo de los desplazamientos y derivas máximos no existe variación. Sin embargo, en el índice de daño sí existe una variación porcentual al considerar réplicas sísmicas, siendo la diferencia promedio de 12.57% para la metodología de escalamiento y 9.71% para la metodología de ajuste espectral. Finalmente, se encontró que el uso del ajuste espectral genera resultados más altos y muy conservadores respecto al empleo del escalamiento de registros.

**Palabras clave:** réplicas, acelerograma, derivas, índice de daño, vulnerabilidad.

## ABSTRACT

The school buildings of the Cajamarca district are located in a seismic hazard zone. Likewise, it is natural that when an earthquake occurs, it is followed by one or more aftershocks. However, the study of the effects of an earthquake on a structure is usually carried out considering only the main earthquake. The objective of this research is to determine the influence of seismic aftershocks on the drifts and damage index of a school building located in the district of Cajamarca. To this end, a mathematical model of the structure was made using sclerometry data and characterizing the non-linear properties of the structural elements. Fourteen seismic records were used, both main earthquakes and their aftershocks, which have been made compatible with local seismic hazard using the scaling and spectral adjustment methodologies, then the analysis was performed in the Perform 3D program. The results show that when including seismic aftershocks for the maximum displacements and drifts, there is no variation. However, in the damage index there is a percentage variation when considering seismic aftershocks, the average difference being 12.57% for the scaling methodology and 9.71% for the spectral adjustment methodology. Finally, it was found that the use of spectral adjustment generates higher and very conservative results with respect to the use of log scaling.

**Keywords:** aftershocks, accelerogram, drifts, damage index, vulnerability.



## CAPÍTULO I

### 1 INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Planteamiento del problema

##### 1.1.1 Contextualización

Existen tres cinturones sísmicos en la tierra, entre ellos el Circunpacifico, el cual por sí mismo representa la zona con mayor riesgo sísmico del mundo. Según National Geographic (s.f.) *“El setenta y cinco por ciento de los volcanes de la Tierra, más de 450 volcanes, se encuentran a lo largo del Anillo de Fuego. El noventa por ciento de los terremotos de la Tierra ocurren a lo largo de su trayectoria, incluidos los eventos sísmicos más violentos y dramáticos del planeta”*.

Por su ubicación el Perú se halla dentro de la zona de acción del cinturón de fuego Circunpacifico, siendo, por tanto, un lugar que requiere construcciones sismorresistentes. El propósito de una estructura sismorresistente está alineado a la filosofía de la Norma E.030 *“evitar pérdidas humanas, asegurar la continuidad de servicios básicos y minimizar los daños a la propiedad”* (SENCICO, 2020, pp.09).

En los últimos años han ocurrido numerosos sismos y en distintos países que pertenecen al cinturón de fuego Circunpacifico. En Perú, el último gran sismo ocurrió en el año 2007, al respecto Tavera (2020) menciona que el sismo dejó un saldo de 600 personas muertas, 1300 heridos, 450 000 damnificados y 48 000 viviendas destruidas. De allí la necesidad de contar con edificaciones correctamente diseñadas.

De acuerdo con la zonificación sísmica peruana, Cajamarca está ubicada en zona de sismicidad 3, por lo que pueden ocurrir fuertes aceleraciones del terreno en el orden de 0.35g con una probabilidad de 10% de excedencia en 50 años (SENCICO, 2020, pp.13). Estos sismos que pueden ocurrir, por su naturaleza vienen seguidos de réplicas sísmicas.

Existen varios autores que han estudiado las réplicas sísmicas como Admuthe, S. (2018), Chang, Z. (2013), Massumi, A. et al (2021), entre otros. Sin embargo, hay pocos estudios que se enfoquen solamente en las derivas e índice de daño y su afectación por las réplicas sísmicas. Esto se puede realizar por medio del análisis dinámico no lineal.

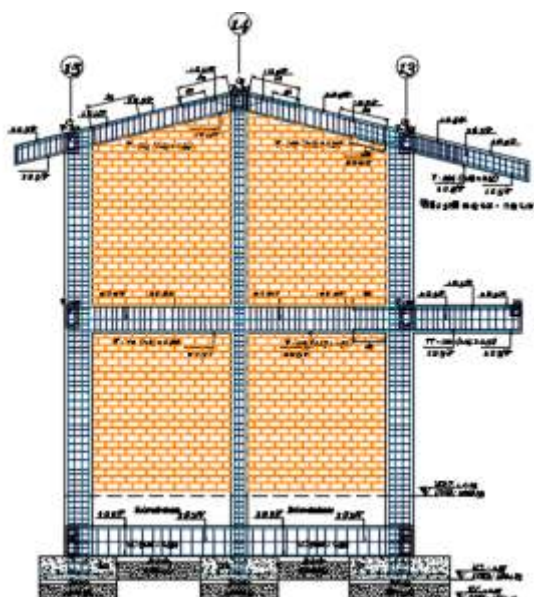
De acuerdo con el FEMA 356 (2000) en el análisis dinámico no lineal se incorpora directamente las características de deformación de carga no lineal de componentes individuales y la edificación está sujeta a un evento sísmico representado por registros de aceleraciones. Siendo la I.E. N°82030 Fernández Gil una edificación esencial, así como muchas escuelas en el distrito de Cajamarca que alberga numerosos estudiantes, merece la pena ser estudiada bajo este enfoque.

### **1.1.2 Descripción del problema**

En el distrito de Cajamarca en las últimas décadas no han ocurrido sismos de gran intensidad. No obstante, debido a su ubicación, geología y naturaleza de suelos se puede afirmar que está experimentando un silencio sísmico, manteniéndose muy probable la ocurrencia de un evento sísmico de gran intensidad.

Asimismo, en los últimos años se han realizado numerosos proyectos de inversión en zonas rurales de Cajamarca con la finalidad de mejorar la calidad del servicio educativo. Para ello, se han construido escuelas del nivel primario y secundario en muchos centros poblados tales como Urubamba, Paríamarca, Porcón, etc. Básicamente estas instituciones se han diseñado con la norma técnica E.030 del año 2003, usando un sistema mixto de albañilería y pórticos de concreto armado. En general, se tiene la siguiente configuración estructural de dos niveles con vigas y columnas de concreto armado confinando muros de albañilería y corredor voladizo en el segundo nivel.

Figura 1. Configuración típica de instituciones educativas



Cabe agregar que de acuerdo con Minedu (2022) en la provincia de Cajamarca, para el año 2021 se tuvo 123 037 alumnos matriculados. De este dato un 42.32% del total de alumnos de provincia estudian en zonas rurales comprendidos entre los niveles inicial, primario y secundario. También indica que el número de docentes de toda la provincia que enseñan en áreas rurales es de 2884 es decir un 37% del total. Por lo mencionado, es sabido que existen muchas personas expuestas a los daños que puedan ocurrir en las estructuras de los centros educativos durante un sismo.

Asimismo, Minedu (2022) señala que el porcentaje de instituciones educativas construidas de material de concreto y ladrillos es de 83%, siendo este porcentaje de 72% en el año 2016, lo que indica que continuamente se está construyendo infraestructura educativa. Sin embargo, así como se están construyendo edificaciones escolares año a año, también la norma técnica de diseño sismo resistente ha ido cambiando.

Los centros educativos son edificaciones del tipo A2, es decir, son edificaciones esenciales (SENCICO, 2020, p.18). De acuerdo con Harati, et al (2019) los reportes luego de un sismo muestran que los daños en elementos estructurales de diferentes

edificaciones están relacionados a la duración de los sismos, así como a los altos ciclos no lineales de los elementos estructurales previos a la falla. Igualmente, señala que estructuras sometidas a movimientos sísmicos de larga duración han perdido su capacidad resistente en promedio de 80% de la capacidad obtenida en estructuras semejantes expuestas a sismos cortos. De allí la importancia de considerar la duración como una variable relevante dentro de los análisis sísmicos, en este caso sismos con réplicas, los cuales representan la acción de un sismo más largo respecto a un evento único.

En este sentido, la norma peruana E. 030 de “Diseño Sismorresistente” en su capítulo IV (SENCICO, 2020, pp. 29) refiere el análisis dinámico tiempo - historia como un método complementario a los procedimientos de análisis sísmico de fuerzas equivalentes y modal espectral, no mencionando la posibilidad de realizar análisis no lineales para estudiar el comportamiento de una estructura.

El empleo de un análisis dinámico tiene la virtud de permitir el uso acelerogramas, los cuales contienen la duración del evento sísmico, que es una ventaja respecto al análisis modal espectral especificado en muchos códigos sismorresistentes. Cabe agregar que, el uso del procedimiento de ajuste espectral y escalamiento de registros definido en el ASCE 7-22 (2021) permite representar registros sísmicos coherentes con el peligro sísmico de la zona.

De esta manera es factible estudiar los efectos de un sismo caracterizado con réplicas en comparación con un sismo único para en cualquier estructura, más aún, incursionando en el rango no lineal es factible obtener resultados más precisos. En este caso se pueden resolver las inquietudes referidas a qué ocurriría con la estructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil en la localidad de Pariamarca, edificación con configuración estructural típica en escuelas rurales.

### **1.1.3 Formulación del problema**

¿Cuál es el efecto de las réplicas sísmicas sobre las derivas e índice de daño en la I.E. N°82030 Fernández Gil en la localidad de Paríamarca, Cajamarca?

### **1.2 Justificación e importancia**

En el aspecto normativo, el reglamento E.030 “Diseño Sismorresistente” no considera el análisis no lineal tiempo historia como método de análisis estructural, más bien solamente como un procedimiento complementario. Sin embargo, actualmente este método es uno de los más empleados para diseño e investigación, siendo considerado por reglamentos como el FEMA 356 (2000) y el ASCE 7-22 (2021). En este último se menciona el ajuste espectral como metodología para aproximar registros sísmicos externos al peligro sísmico de la zona de estudio (ASCE 7-22, 2021, pp. 187).

Respecto a la presente investigación, en Cajamarca no se han realizado estudios sobre el efecto que tiene un sismo con réplicas sobre las derivas y el índice de daño de edificaciones. En general no se toma en cuenta esta variable, sin embargo, J. Han (2015) sugiere que, con la misma medida de intensidad, sismos con réplicas pueden inducir mayor desplazamiento de entrepiso y una mayor probabilidad de colapso de la estructura. Asimismo, la capacidad de resistencia al colapso de la estructura tiende a reducirse con el incremento de la duración del evento telúrico.

Por lo mencionado, resulta importante aplicar estos procedimientos de análisis en edificaciones esenciales, en este caso instituciones educativas. De esta manera, se puede demostrar a los involucrados qué porcentaje de daños tendrían las instituciones educativas si ocurriera un sismo con réplicas a diferencia de un sismo único, como normalmente se considera en los estudios de riesgo. Esto ayudará a mejorar los planes de evacuación y prevención para evitar pérdidas humanas en el futuro.

### 1.3 Delimitación de la investigación

- Esta investigación se centra en el estudio de las derivas y el índice de daño en una edificación con sistema estructural mixto de albañilería y pórticos de concreto armado sometido demandas de sismos únicos y con réplicas. Contempla el uso del análisis dinámico no lineal, la respuesta estructural es medida en términos de desplazamiento e índice de daño considerando criterios de la norma peruana, así como lo códigos extranjeros.
- Para las propiedades mecánicas del concreto se han considerado ensayos de esclerometría.
- Se ha empleado las metodologías de ajuste espectral con dominio en el tiempo, y escalamiento de registros para el tratamiento de las señales sísmicas.
- La cantidad de señales sísmicas seleccionadas para el análisis es de siete.
- Para la selección de registros sísmicos se ha tomado los siguientes criterios:
  - Para el caso del método de escalamiento, se ha considerado señales sísmicas que hayan sido registrada en el mismo tipo de suelo donde se ubica la estructura estudiada. Para ello, se ha realizado el análisis de la transformada de Fourier de cada señal sísmica para hallar los periodos predominantes que ayudan a definir el tipo de suelo.
  - Se ha considerado sismos representativos en la sismicidad histórica del Perú (sismos de subducción y de intraplaca).
  - Información histórica de registro de réplicas.
  - Promedio de aceleración máxima del suelo mayor a 0.05g
  - Réplicas que ocurren en un lapso máximo de 60 días.
  - Los sismos principales y las réplicas se han registrado en la misma estación sísmica.
  - En sismos que tienen múltiples réplicas se ha seleccionado la de mayor magnitud.

## **1.4 Limitaciones**

- El acceso a los registros sísmicos en línea y de las estaciones de la ciudad de Cajamarca ha sido una limitación porque redujo la cantidad de posibles señales sísmicas a emplear en el estudio.
- Por la situación sin precedentes ocasionada por la COVID-19 la institución educativa se encontró cerrada por dos años. Esto retrasó la recolección de información, aunque sí se han realizado las gestiones correspondientes para tomar los datos necesarios.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

- Determinar el efecto de las réplicas sísmicas sobre las derivas e índice de daño en La I.E. N°82030 Fernández Gil, en la localidad de Pariamarca, Cajamarca.

### **1.5.2 Objetivos específicos**

- Calcular las derivas de entrepiso máximas producidas por sismos únicos y sismos con réplicas en la estructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil.
- Comparar las derivas de entrepiso máximas producidas por sismos únicos y sismos con réplicas en la estructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil.
- Calcular el índice de daño producido por sismos únicos y sismos con réplicas en la estructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil
- Comparar el índice de daño producido por sismos únicos y sismos con réplicas en la estructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil
- Comparar los resultados obtenidos al usar el método de ajuste espectral de registros sísmicos y el método de escalamiento de amplitudes para calcular las derivas e índice de daño de la estructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil.

## CAPITULO II

### 2 MARCO TEORICO

#### 2.1 Antecedentes de la investigación o marco referencial

##### Antecedentes internacionales

Han, R. et al., (2015) evaluaron el comportamiento sísmico de edificios incorporando réplicas, proponen un método para sintetizar réplicas debido al limitado número de registros sísmicos con los que se cuenta, el cual es validado al comparar los resultados obtenidos con registros reales de sismo principal – réplica. Asimismo, mostraron que sólo considerando el sismo principal en el análisis sísmico se puede subestimar el riesgo sísmico pero la subestimación es limitada.

W. Huang, J. Qian & Q.S. Fu (2014) en su investigación titulada “Evaluación de daños de estructuras de marcos de concreto armado bajo secuencias de sismos con réplicas” evaluaron una edificación de concreto armado de tres niveles con estructura aporticada sometida a registros sísmicos con réplicas y sismos únicos para verificar sus diferencias en desplazamientos e índice de daño (calculado con la teoría de Park y Yang). Encontraron que las secuencias de réplicas no afectan significativamente las derivas, no obstante, el daño acumulado sí se ve influenciado por la presencia de réplicas sísmicas ya que demuestran que este índice incrementa gradualmente con la magnitud de las réplicas.

Chang, Z. et al (2013) en su artículo “Espectro de daño para secuencia de registros sísmicos con réplicas “(original en inglés) emplearon el índice de Park-Ang para la estimación de daño, así como un método de simulación de registros sísmicos con réplicas para investigar su efecto en el periodo de vibración, factor de reducción de resistencia, condiciones de sitio, coeficiente de amortiguamiento en el espectro de manera estadística. Asimismo, afirmaron que *“fuertes réplicas pueden aumentar el estado de daño de las estructuras. Este fenómeno, denominado acumulación de daños como resultado de ataques sísmicos secuenciales, ha sido confirmado en los*



*reconocimientos de campo posteriores al terremoto*". Asimismo, concluyeron que una secuencia sísmica tiene un efecto significativo en el espectro de daño y múltiples réplicas moderadas pueden causar daño en estructuras semejante al daño ocasionado por la réplica más larga.

Tesfamarian, S. et al., (2015) estudiaron la vulnerabilidad sísmica de elementos de concreto armado con albañilería no reforzada en presencia de secuencias de sismos con réplicas. Estudiaron los pórticos de un edificio de concreto reforzado de 6 niveles así como albañilería de dos espesores (75mm o 125 mm), los cuales fueron sometidos a 100 registros sísmicos con réplicas escaladas a un peligro sísmico correspondiente a un periodo de retorno de 2500. Los resultados mostraron que hay un cambio en el periodo fundamental y la deriva de entrepiso, asimismo se encontró que los pórticos reciben más daño que los muros de albañilería.

Wen, W., et al (2019), en su investigación "Factores de pérdida de resiliencia para la evaluación y diseño considerando los efectos de réplicas" estudiaron la pérdida de resiliencia en una estructura de concreto armado a través de un factor pérdida de resiliencia de dicha estructura sometida a secuencias de sismos con réplicas. En los resultados encontraron que las réplicas pueden incrementar la pérdida de resiliencia respecto a un sismo único y el factor de pérdida de resiliencia propuesto refleja dicha pérdida, la cual excede el 400% cuando el umbral de reemplazo es alcanzado.

Deka et al. (2014) "Evaluación de daño de estructuras porticadas de concreto armado bajo réplicas de larga duración de movimiento sísmico" (original en inglés) cuantificaron la influencia de la duración de los movimientos sísmicos seguidos de réplicas en el daño acumulado en edificios de concreto armado. Los resultados obtenidos mostraron que las deformaciones inelásticas no sufren mayores diferencias con secuencias de sismos, pero sí se evidencian cambios en el daño acumulado. Por

tanto, utilizar solo los parámetros de desplazamiento como medidas de desempeño no es suficiente para reflejar el daño de la estructura.

Iervolino, et al. (2019) en su artículo "Acumulación de daño sísmico en múltiples secuencias de sismos y réplicas" (original en inglés) estudiaron el efecto de réplicas sísmicas en la medición del daño acumulado en distintas estructuras de concreto para varias zonas sísmicas de Italia. Sus resultados mostraron que en algunas zonas el incremento de la probabilidad de colapso en 100 años introduciendo el daño acumulado es de 53% usando sólo sismos principales pero esa probabilidad cambia a 134% cuando se consideran réplicas sísmicas.

Jalayer, F. y Ebrahimian, H. (2016) "Evaluación del riesgo sísmico considerando el daño acumulativo debido a réplicas" (original en inglés) estudiaron el efecto de considerar réplicas sísmicas en la evaluación sísmica de estructuras de concreto armado resistentes a momentos con muros. Demostraron que considerando réplicas sísmicas las edificaciones exceden el nivel de cercano al colapso a diferencia de los resultados obtenidos cuando sólo se considera el sismo principal donde no se llega al nivel de cercano al colapso.

Massumi, A., Sadeghi, K. y Ghaedi, H. (2021) "Efectos de sismos principales y réplicas en sismos sucesivos en la respuesta de edificaciones de pórticos de concreto armado considerando la influencia de la componente vertical" (original en inglés). En esta investigación se estudiaron dos edificaciones de pórticos de concreto armado de 6 y 10 niveles, las cuales en primera instancia fueron sometidas a sismos con réplicas donde se observó que previo a someter a la estructura a la excitación dinámica de las réplicas sísmicas, esta estructura ya contaba con un nivel de daño ocasionado por el sismo principal. Por ello, se encontró que la ratio de derivas de entrepiso aumentaba para este caso. Más aún, incluyeron en el análisis la componente vertical del sismo, hallando que

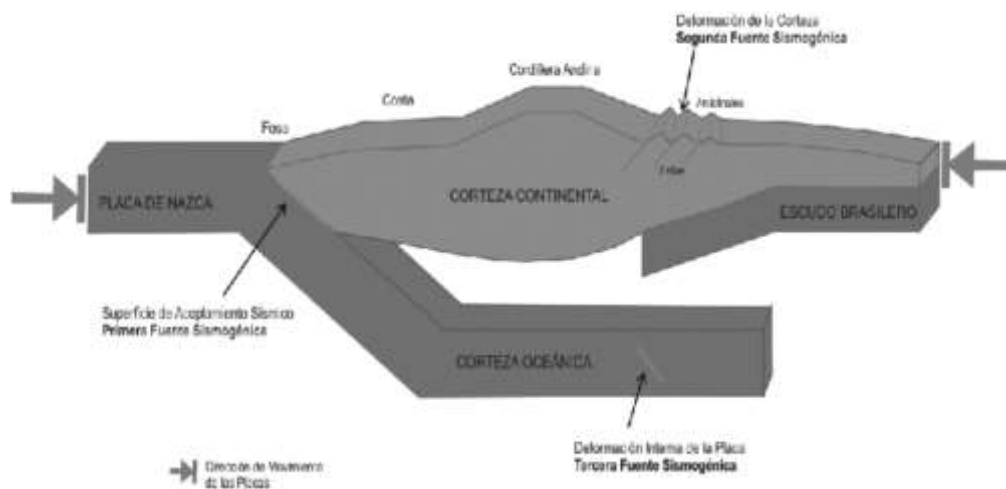
la probabilidad de la estructura de colapsar se incrementa en un 30% respecto de usar sólo las componentes ortogonales del sismo.

## 2.2 Marco doctrinal de las teorías particulares en el campo de la ciencia en la que se ubica el objeto de estudio (Bases teóricas)

### 2.2.1 Sismicidad En Perú

De acuerdo con Bernal et al (2015), la sismicidad en el territorio peruano es ocasionada por procesos de subducción de placas y la dinámica de cada una de las unidades tectónicas presentes en el interior del continente. Asimismo, el criterio que toma el autor para clasificar los sismos en el Perú está en función de su rango de profundidad focal: superficiales < 60 km, intermedios entre 61km y 350 km, y profundos > 351 km.

Figura 2. Mecanismos de sismicidad en el Perú.



Nota: Fuente: Tavera (2017).

Al respecto, Tavera (2017) señala que en el Perú la distribución espacial de los sismos ha permitido establecer la existencia de tres fuentes sismogénicas principales. La primera, considerada la más importante, está representada por la superficie de fricción entre las placas de Nazca y Sudamericana. Dicha fuente ha sido el motivo de los más importantes sismos ( $M > 7$  Mw). Luego, la segunda fuente involucra la deformación superficial de la corteza continental con la presencia de fallas geológicas. Históricamente

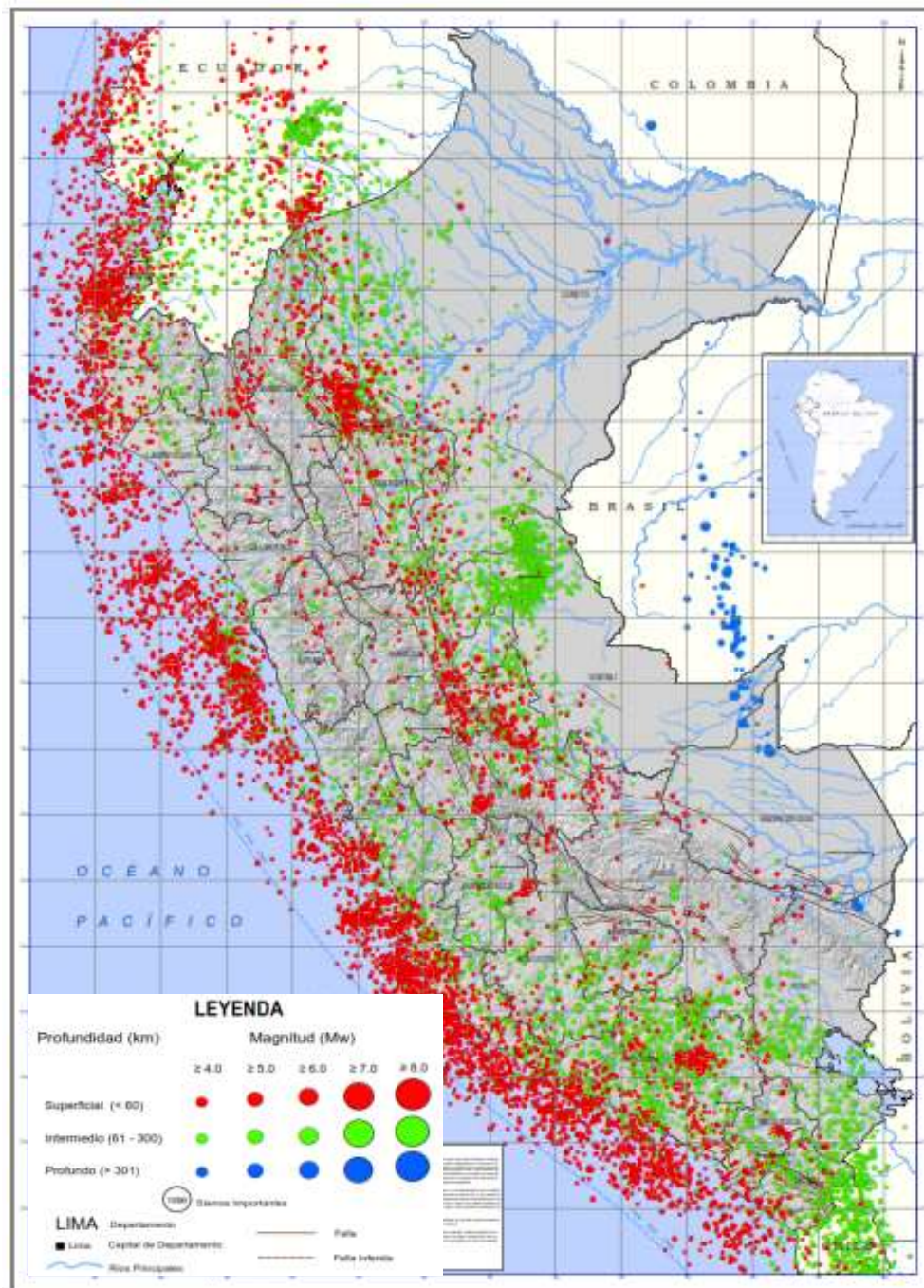
se ha encontrado que esta fuente genera sismos de magnitud moderada. La tercera fuente se refiere a la deformación interna de la placa de Nazca por debajo de la cordillera de los Andes a niveles de profundidad del orden de 100 km a más.

#### **2.2.1.1 Sismicidad histórica**

Dentro de la sismicidad histórica se tiene en cuenta la data de los sismos importantes que afectaron al Perú en su historia, lo cual es esencial para estimar el real potencial sísmico que cada región tiene. Esta data ha sido constantemente acumulada en registros sísmicos que son compilados por el Instituto Geofísico del Perú, siendo importante para ello la fecha de ocurrencia y la profundidad focal. La mayoría de eventos sísmicos superficiales han ocurrido en la costa del país.

En la *Figura 3* se aprecia la distribución espacial de los eventos con magnitudes igual o mayores a 4.0 en la escala “magnitud momento” ( $M_w$ ) ocurridos durante el periodo 1960 – 2017. Los sismos fueron clasificados en función de la profundidad de sus focos. Asimismo, en el mapa el tamaño de los símbolos indica la magnitud del sismo y representa la cantidad de energía liberada y que puede ser expresada en escalas de Richter (ML), ondas de volumen (mb), ondas superficiales (Ms) y recientemente a partir del momento sísmico ( $M_w$ ). Otra forma de cuantificar un sismo es por el sacudimiento del suelo y por los daños que causan en zonas urbanas, siendo medido en grados de intensidad en la escala de Mercalli modificada (MM).

Figura 3. Sismicidad histórica en el Perú.



Nota: Instituto Geofísico del Perú, mapa sísmico periodo 1960 - 2017 (2017).

De acuerdo con el mapa se puede observar que históricamente la mayoría de las zonas urbanas en el país han sufrido algún sismo de diferente intensidad en los últimos cincuenta años. Es visible en el mapa que los sismos de foco superficial (rojo) ocurren

en mayor medida en la zona costera, aunque estos sismos también ocurren también a lo largo de la cordillera andina y en buena parte en la región selva.

Por otro lado, los sismos con foco intermedio normalmente han sucedido en el sur del Perú y los sismos de foco profundo tienen sus epicentros en la zona fronteriza de Perú y Brasil en la dirección norte – sur y en la frontera Perú – Bolivia en la dirección este – oeste SGD (2020).

#### **2.2.1.2 Sismicidad registrada**

La información instrumental ayuda a definir y valorar las propiedades de las fuentes sismogénicas que identifican a una región. Bernal et al (2015) señala que desde los años sesenta ya se disponía a nivel mundial de un número aceptable de estaciones sísmicas cuya información ha permitido ir reduciendo los errores en el cálculo de los parámetros que caracterizan un sismo.

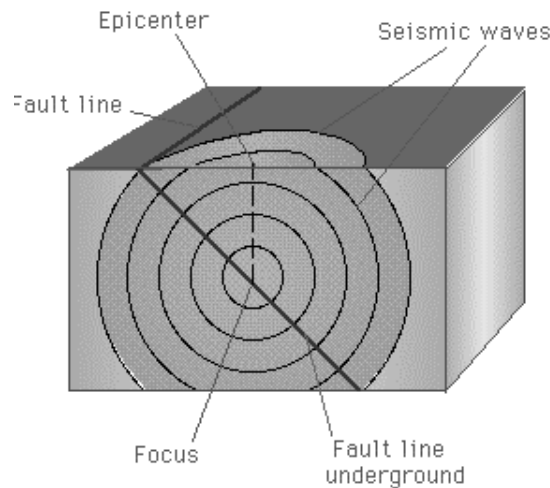
Actualmente el Perú cuenta con una red sísmica nacional (RSN) a cargo del Instituto Geofísico del Perú, la misma que actualmente ha incrementado en número y cobertura a nivel nacional (IGN, 2017). La red sísmica nacional está compuesta de un grupo de estaciones sísmicas multiparámetros a lo largo de todo el territorio nacional. Es importante agregar que una estación multiparámetros se conforma por sensores y sistemas de data de movimiento del suelo en velocidad, aceleración y posición.

#### **2.2.2 Sismos**

Los sismos son vibraciones que ocurren en la superficie debido a la disipación de energía en el interior. Son muy difíciles de predecir y ocasionalmente ocurren sin aviso. A medida que las placas tectónicas se mueven unas sobre otras, no lo hacen con suavidad, sino que se enganchan y acoplan permitiendo que se acumule energía. Cuando las placas finalmente se mueven esta energía se libera en forma de ondas sísmicas de choque a través de la corteza terrestre.

El punto donde ocurre el desplazamiento que produce la liberación de energía se llama Foco, asimismo, el punto sobre la tierra que se proyecta desde el Foco se llama Epicentro.

*Figura 4. Puntos importantes en la ocurrencia de un sismo*



*Nota: Coolgeography (2020)*

### 2.2.2.1 Tipos de ondas sísmicas

Autores como Kuznetsov (2011) han clasificado los tipos de ondas sísmicas en:

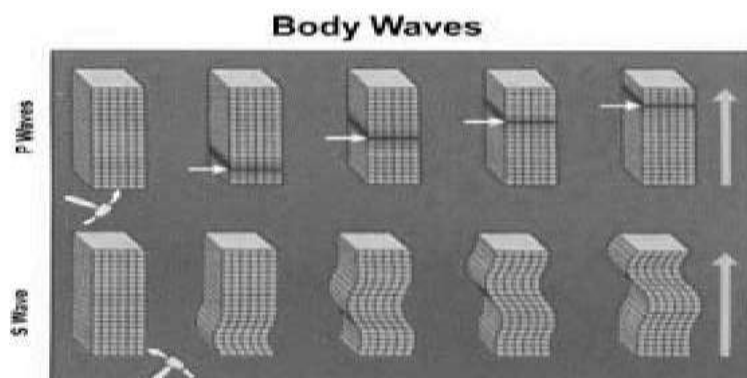
- **Ondas Rayleigh:** Son ondas que viajan cerca de la superficie de los sólidos, incluyen movimientos transversales longitudinales que decrecen exponencialmente su amplitud en la medida en que la distancia al origen aumente.
- **Ondas Stoneley:** Este tipo de ondas se propagan en la interacción de dos superficies en contacto. A diferencia de las ondas Rayleigh, estas ondas se pueden propagar solo si las constantes de los materiales en contacto satisfacen ciertas condiciones especiales.

- **Ondas Love y SH:** Son ondas horizontales de corte que se propagan en la interacción entre capas elásticas en contacto con capas semi-elásticas.

Por otro lado, autores como Kayal (2016) indican que existen dos tipos básicos de ondas sísmicas generadas por un terremoto, estas son *ondas de cuerpo* y *ondas de superficie*.

- **Ondas de cuerpo:** Este tipo de ondas se propagan dentro del cuerpo de la corteza terrestre, abarca varios tipos como las ondas primarias (P-wave) que son las más rápidas y las más lentas se denominan ondas secundarias (S-wave).
  - P-wave. Esta onda sísmica alternativamente comprime y expande la roca. El movimiento de las partículas es siempre en la dirección de la propagación. La P-wave viaja a través de sólidos como la roca y a través de líquido como el magma volcánico o agua.
  - S-wave. También denominado onda de corte (*Shear wave*), pasa por la roca atravesándola de manera perpendicular a la dirección de propagación. A diferencia de las ondas P, estas ondas no se propagan a través de líquidos.

Figura 5. Ondas de cuerpo



Nota: Kayal (2016).

- **Ondas de superficie:** Se denominan así porque su movimiento está restringido a las cercanías de la superficie del suelo. Asimismo, el movimiento de las ondas está localizado en las afueras de la superficie misma, es decir, mientras aumente



la profundidad debajo de la superficie, el desplazamiento de estas ondas disminuye proporcionalmente. Las ondas de superficie en sismos pueden dividirse en dos tipos: ondas Love y ondas Rayleigh, las cuales han sido descritas anteriormente.

### 2.2.2.2 Formas de medir un sismo

Los sismos pueden ser medidos usando dos escalas: Richter y Mercalli. La escala de Mercalli mide los efectos de un sismo en un nivel desde 1 a 12. Mientras mayor es el coeficiente, mayor es el daño experimentado por las personas y por las estructuras de las edificaciones. Por su parte, la escala de Richter es diferente ya que mide la energía del sismo. La escala es logarítmica, que significa que por cada salto en la escala se obtiene un aumento de diez veces en la potencia de un sismo. Por ello, una magnitud de 6 es 10 veces más poderoso que una magnitud de 5 y 100 veces más fuerte que un sismo de magnitud 4. Así, se puede afirmar que mientras más magnitud tiene un sismo, este ocurre con menos frecuencia. El terremoto más destructivo jamás registrado ocurrió en Valdivia Chile en 1960 con una magnitud de 9.5 en la escala.

Figura 6. Comparación entre escalas para medir un sismo

Escala Richter de magnitud	Escala de Intensidad de Mercalli Mod.	Nº de sismos por año	Efecto en áreas pobladas
< 3,4	I	800 000	Registrado solo por sismógrafos
3,5 - 4,2	II e III	30 000	Sentido por algunas personas
4,3 - 4,8	IV	4800	Sentido por muchas personas
4,9 - 5,4	V	1400	Sentido por toda la gente
5,5 - 6,1	VI e VII	500	Pequeños daños en edificios
6,2 - 6,95	VIII e IX	100	Muchos daños en edificios
7,0 - 7,3	X	15	Daños profundos. Fracturas en paredes
7,4 - 7,9	XI	4	Grandes daños. Colapso de edificios
> 8	XII	1 entre 5 y 10 años	Destrucción total. Topografía alterada

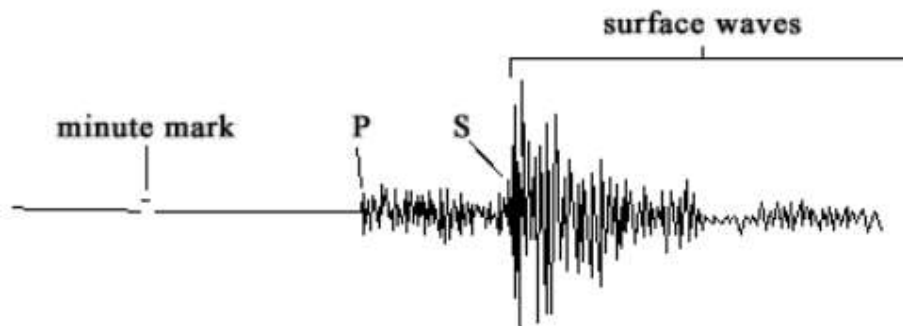
Nota: Coolgeography (2020)

### 2.2.2.3 Registros sísmicos

Un registro sísmico lleva la información de las ondas sísmicas a su paso por una determinada zona. Desde el último siglo los científicos han desarrollado varias maneras de medir o registrar un sismo. Para ello se emplea un sismógrafo que produce una representación gráfica de las ondas sísmicas que recibe y las registra en un sismograma.

Un sismograma representa líneas ondulantes alrededor de una horizontal. Estas son las ondas sísmicas que el sismógrafo ha registrado. Dentro del registro sísmico normalmente se pueden identificar las ondas que lo conforman. Primero se observan las ondas de cuerpo que son las más rápidas y normalmente después vienen las ondas de superficie.

Figura 7. Sismograma típico



Nota: Michigan Tech (2020)

En la Figura 7 se observa que la onda P (P-wave) se encuentra primero en el sismograma debido a que son ondas más rápidas. Lo siguiente que se puede observar son las ondas de superficie (Surface-waves) que por lo general son más grandes que las ondas P.

#### **2.2.2.4 Acelerógrafos y acelerogramas**

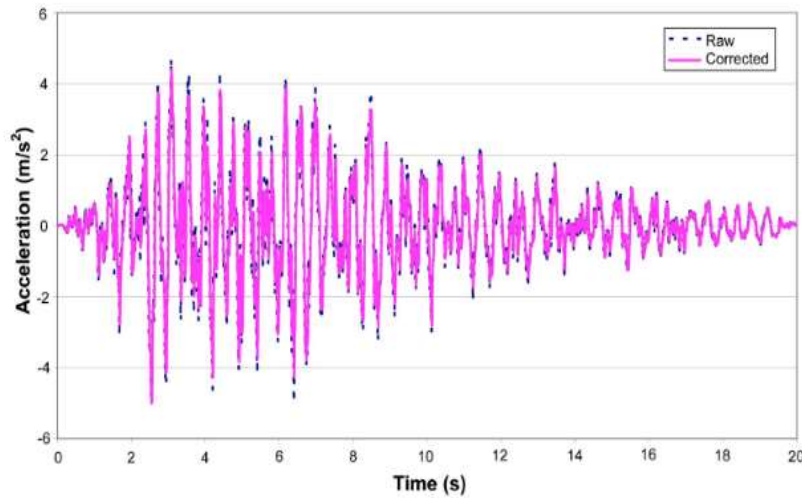
De acuerdo con Herraiz (2006) los movimientos en el suelo o en una estructura debidos a un sismo pueden estudiarse en función del desarrollo de los desplazamientos, velocidades o aceleraciones. En estaciones de campo, los sismógrafos se encargan de registrar velocidades o desplazamientos, en el campo próximo al evento sísmico son los acelerógrafos y registran aceleraciones.

El valor de la aceleración se expresa por lo general en valores de aceleración de la gravedad ( $g$ ), parámetro que es útil en el campo de la ingeniería ya que puede relacionarse dimensionalmente con la fuerza. Asimismo, los acelerógrafos pueden registrar un amplio margen de frecuencias como periodos cortos de estructuras, entre otros.

Sarma (2013) señala que la aceleración obtenida por los acelerómetros puede ser integrada para obtener valores de velocidad y desplazamientos. Aunque, hay problemas asociados con el proceso de integración, por ello usualmente los desplazamientos obtenidos usando ese procedimiento no son muy confiables. De manera similar, los desplazamientos pueden se obtenidos de sismogramas y, por medio de diferenciales, obtener velocidad y aceleración. Sin embargo, el proceso numérico es siempre inexacto cuando se calculan los picos.

Por otro lado, los acelerogramas obtenidos siempre deben ser corregidos, a fin de tener el registro de sus tres componentes de manera adecuada. Las principales correcciones que se realizan son: corrección instrumental y corrección de línea base. Seguidamente, una vez corregido el acelerograma, se emplearán filtros necesarios para excluir los posibles efectos que puede tener el ruido sobre la señal sísmica. Esto se logra usando filtros pasos- baja para eliminar altas frecuencias y los pasos-alta para eliminar bajas (Carreño, et al. 1999).

Figura 8. Ejemplo de acelerograma sin corregir y corregido



Nota: Burdette, N. et al (2008).

### 2.2.2.5 Réplicas sísmicas

Riga, G. y Balocchi, P. (2017) señalan que usualmente las réplicas son eventos sísmicos que ocurren después de un fuerte sismo y que desempeñan un rol importante en el desarrollo de la secuencia sísmica por lo que no deben ser ignorados. Es así que el sismo que libera mayor cantidad de energía se considera como principal mientras que el grupo de eventos disruptivos que vienen después se consideran réplicas. Por su parte Liu, M. y Stein, S. (2011) señalan que las réplicas ocurren en su mayoría en la superficie de ruptura que originó el sismo principal, por lo que sirven para definir la compleja geometría del plano de ruptura. También indican que la ocurrencia de una réplica disminuye con el tiempo siguiendo un patrón conocido como Ley de Omori:

$$n(t) = \frac{K}{(c + t)^p} \dots (1)$$

Donde:

n (t): es el número de réplicas en función del tiempo t.

K, p, c: constantes.

De acuerdo con Guglielmi (2016) la Ley de Omori se puede interpretar del siguiente modo: *“Después de la ocurrencia del choque principal, la fuente del terremoto comienza a relajarse. Hablando metafóricamente, se enfría gradualmente. Sin embargo, esto es muy diferente al enfriamiento regular de un cuerpo homogéneo calentado. Por el contrario, una fuente, que es un sistema estructurado altamente no lineal, sufre procesos complejos que se manifiestan, en particular, por una actividad de réplica sostenida”*.

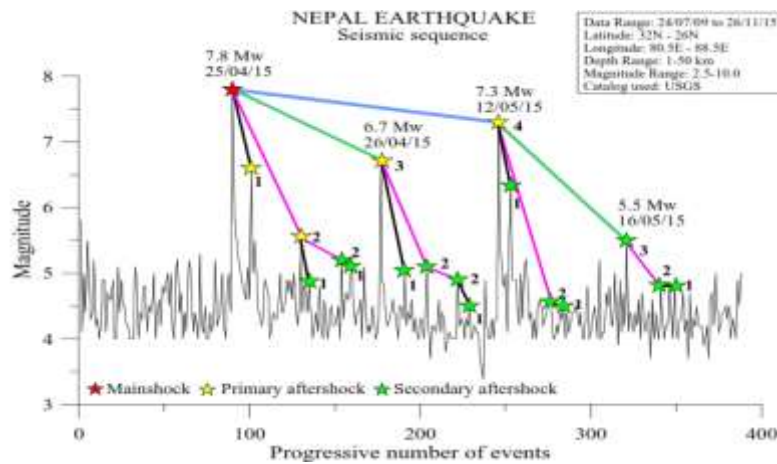
Por otro lado, un sismo principal puede ser seguido por varios tipos de réplicas. Comúnmente se conocen dos tipos de réplicas, las primeras se denominan réplicas sísmicas directas y está relacionado con la Ley de Omori descrita anteriormente. En cambio, el segundo tipo de réplicas ocurre en cualquier falla que ha sido fuertemente estresada por un sismo previo, en este caso se puede decir que la Ley de Omori se puede aplicar desde cuando se desencadena el choque en lugar de cuando ocurre el sismo principal.

Al respecto, Kisslinger (1996) define tres tipos de réplicas, la primera denominada Clase 1, que son eventos que ocurren en el área de ruptura del plano de falla. La segunda llamada Clase 2 que ocurre en la misma falla, pero afuera del área sísmica de ruptura. Por último, réplicas Clase 3 que son sismos que ocurren en un lugar aleatorio, en fallas que son diferentes de la que ha generado el sismo principal. Indica también que las réplicas que ocurren dentro de las 24 a 48 horas después de un fuerte sismo en el área de ruptura serían predominantemente de Clase 1, aunque después de intervalos largos de tiempo, el área de ocurrencia incrementa dando lugar a réplicas de segunda clase.

En la siguiente figura se observa la ocurrencia de un sismo importante (Nepal en el año 2015), puede desencadenar la aparición progresiva de dos tipos de réplicas. Se observa que el primer tipo de réplicas es consecuencia solamente del sismo principal y el segundo tipo es producido por las variaciones de estrés relacionado con las réplicas

primarias. Ocurren después del primer tipo, pero no están directamente relacionadas con el sismo principal “main shock” (Riga, G. y Balocchi, P., 2017).

Figura 9. Representación esquemática de la fase de réplicas del terremoto de Nepal y clasificación de las réplicas.



Nota: Las líneas de color indican los ciclos de réplicas. Fuente: Riga, G. y Balocchi, P. (2017).

### 2.2.3 Análisis no lineal tiempo historia

Ibraim, S., Farrukh, S. y Hashmath, M. (2017) lo definen como el método más preciso para estimar la respuesta sísmica de las estructuras. En este método la estructura es sometida a registros sísmicos reales conformados por sollicitaciones de aceleración versus tiempo.

La aceleración del suelo se determina en un pequeño intervalo de tiempo para dar el registro de aceleración del suelo. Luego, la respuesta estructural es calculada en cada instante del análisis y el pico de aceleración del registro sísmico es considerado como la demanda para el diseño.

Para la aplicación del análisis no lineal tiempo historia es importante contar con “un modelo matemático directamente incorporando las características no lineales de la edificación” (Ibid, pp. 03). Sabiendo que el modelo matemático representa precisamente la no linealidad de los materiales de la estructura, la respuesta inelástica y los esfuerzos calculados serán razonablemente aproximados a los esperados durante un sismo real.

#### 2.2.4 Espectros de respuesta

El concepto de espectro de respuesta fue primeramente incorporado en los Estados Unidos en la década de 1950 como un coeficiente “C” en la ecuación de fuerza lateral  $V = KCW$  dada por la Asociación de Ingenieros Civiles Estructurales de California (SEAOC), donde V es la fuerza lateral, K es el coeficiente estructural del sistema y W es la carga muerta total. Freeman (2007), señala que durante décadas el espectro de respuesta viene jugando un rol importante en el desarrollo de criterios de diseño sísmico.

Kori, J. (s.f.), explica que para realizar el análisis y diseño de una estructura que será construida en una ubicación específica, se requiere registros de aceleraciones en la zona. Sin embargo, no siempre se encuentran registros sísmicos de cada localización. Asimismo, un análisis sísmico no puede realizarse simplemente basándose en el valor máximo de aceleración del suelo ya que la aceleración del suelo depende de la frecuencia contenida en el registro de aceleración y de las propiedades dinámicas del suelo.

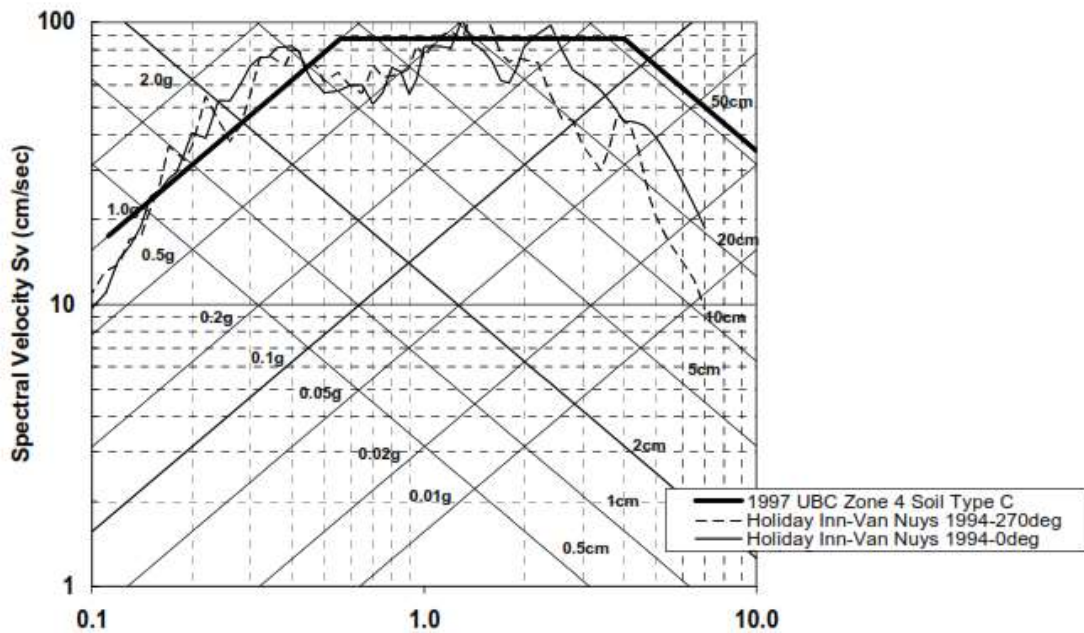
Para superar esta dificultad, el método de espectro de respuesta es la metodología más popular en el análisis sísmico de estructuras. Los espectros de respuesta son una herramienta importante en el análisis sísmico de estructuras ya que describe la máxima respuesta de un sistema elástico de un grado de libertad sometido a un movimiento particular a diferentes periodos.

Es sabido que existen variaciones en el movimiento del suelo en diferentes partes de un territorio para un mismo sismo. Muchas veces los picos y bajos muestran la sensibilidad de las estructuras a una pequeña variación en el periodo natural de vibración. Las grandes variaciones en las características del movimiento del suelo ilustran dificultades para predecir demandas en futuros sismos. Esto lleva al desafío de desarrollar un

espectro de respuesta que de una probabilidad razonable de tener adecuados diseños (Freeman, 2007, pp. 28-29).

Una solución encontrada es el uso de constantes y coeficientes para sitios de alta sismicidad, los mismos que son usados en muchos códigos de construcción. Se consideran la zonificación sísmica, el tipo de suelo, entre otros. Así, se construyen espectros de respuesta suavizados, los cuales pueden estar ploteados en unidades de desplazamiento, velocidad y aceleración espectral.

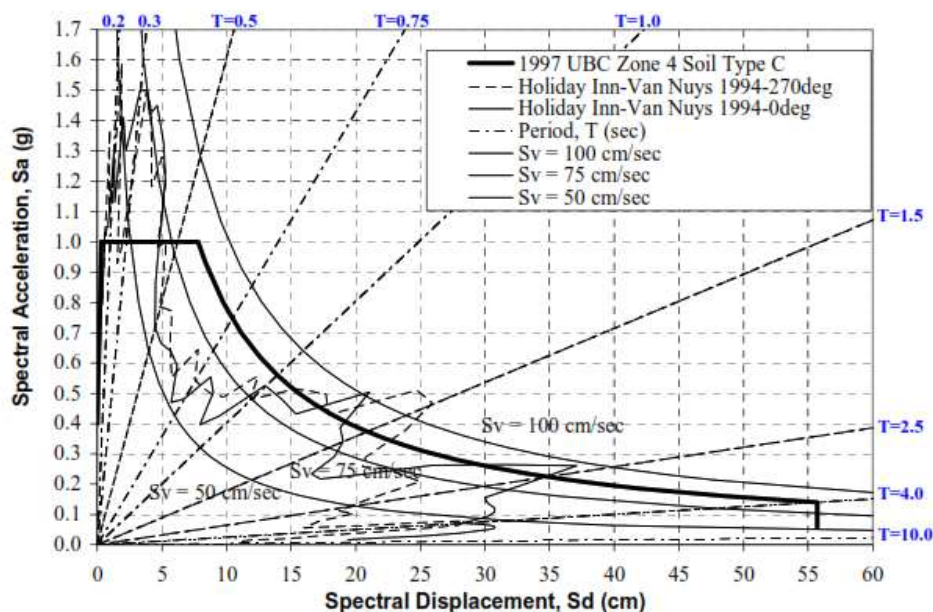
Figura 10. Espectro de respuesta de código de construcción suavizado: Formato tripartito.



Nota: Freeman (2007).



Figura 11. Espectro de respuesta de código de construcción suavizado: Formato ADRS.



Nota: Freeman (2007).

Con el espectro de respuesta dibujado, es más sencillo establecer fuerzas de diseño para una edificación. Para edificios pequeños, donde el modo fundamental de vibración es predominante, se estima el periodo de vibración de la estructura y se encuentra la aceleración correspondiente  $S_a$ . Este dato puede ser usado para estimar el cortante basal para encontrar fuerzas laterales incluyendo algunos ajustes para factores de participación dinámica.

Para edificios altos, donde los efectos dinámicos de modos superiores de vibración son significantes, aceleraciones espectrales para algunos modos son fácilmente encontradas usando los periodos estimados, hallando luego las fuerzas laterales.

No obstante, el método de espectro de respuesta tiene ciertas desventajas como lo señala Labeé, P. (2019), “Cuando se trata de pórticos modernos de hormigón armado, los modelos plásticos aplicables a las estructuras de acero deberían modificarse, pero la conclusión también sería que el máximo de la respuesta, tal como se deriva del espectro de respuesta, no es representativo del daño inducido sísmicamente.”

Asimismo, indica que el espectro de respuesta tiene sus desventajas en la evaluación de sistemas de tuberías y de acero ya que se ha demostrado que la falla en estos escenarios se da principalmente por fatiga y no en la máxima respuesta. Por ello, sería importante enfocarse en la duración del evento sísmico, así como su amplitud efectiva en lugar de considerar sólo la respuesta máxima. Implícitamente se reduce la relevancia del método de espectro de respuesta.

#### 2.2.4.1 Espectro de respuesta sísmica peruano

El espectro de respuesta sísmica del Perú considera cuatro zonas sísmicas, la cual “se basa en la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de estos con la distancia epicentral, así como en la información geotectónica” (SENCICO, 2020, pp. 12).

Figura 12. Zonificación sísmica de la norma técnica E.030 del Perú.



Nota: SENCICO (2020).

Cada zona sísmica tiene un factor Z que se interpreta como la aceleración máxima horizontal en el suelo rígido con una probabilidad de 10% de excedencia en 50 años.

Figura 13. Máxima aceleración sísmica según zonificación

FACTORES DE ZONA "Z"	
ZONA	Z
4	0.45
3	0.35
2	0.25
1	0.10

Nota: SENCICO (2020)

Por otro lado, cada estructura es clasificada según su uso o importancia se asigna un factor de acuerdo con la siguiente tabla:

Figura 14. Factores de uso según categoría de la edificación

CATEGORÍA DE LAS EDIFICACIONES		
CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR U
A Edificaciones esenciales	A1: Establecimientos de salud del Sector Salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud.	Ver nota 1
	A2: Edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después de que ocurra un sismo severo tales como: -Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. - Puertos, aeropuertos, locales municipales, centrales de comunicaciones. Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad y plantas de tratamiento de agua. Todas aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre, tales como instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. Se incluyen edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como grandes hornos, fábricas y depósitos de materiales inflamables o tóxicos. Edificios que almacenen archivos o información esencial del Estado.	1.5
B Edificaciones importantes	Edificaciones que reúnen gran cantidad de personas tales como cines, teatros, estadios, coliseos, centros comerciales, terminales de pasajeros, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos y bibliotecas. También se consideran depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento.	1.3
C Edificaciones comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios o fugas de contaminantes.	1
D Edificaciones Temporales	Construcciones provisionales para depósitos, casetas y otras similares	Ver nota 2

Nota: SENCICO (2020)

En cuanto a los tipos de suelo, la norma técnica E.030 (2020) considera cuatro perfiles de suelo desde So hasta S3. Según el tipo de suelo y la zonificación sísmica a la que pertenece se encuentra el tipo de suelo “S”.

Figura 15. Factor de suelo “S”.

FACTOR DE SUELO "S"				
SUELO	S0	S1	S2	S3
ZONA				
Z4	0.80	1.00	1.05	1.10
Z3	0.80	1.00	1.15	1.20
Z2	0.80	1.00	1.20	1.40
Z1	0.80	1.00	1.60	2.00

Nota: SENCICO (2020)

Correspondientemente con los tipos de suelo la normativa establece valores de  $T_p$  y  $T_L$ , donde el primer valor determina el máximo límite de la zona de la plataforma en periodos cortos y el segundo el límite mínimo en periodos largos.

Figura 16. Periodos  $T_p$  y  $T_L$

PERIODOS $T_p$ y $T_L$				
	So	S1	S2	S3
$T_p(S)$	0.80	1.00	1.05	1.10
$T_L(S)$	0.80	1.00	1.15	1.20

Nota: SENCICO (2020)

Para la construcción del espectro de respuesta sísmico peruano se considera también un factor de amplificación sísmica “C”, el cual está relacionado con el periodo fundamental de vibración, por medio de las siguientes expresiones:

$$T < T_p \quad C = 2.5 \quad \dots (1)$$

$$T_p < T < T_L \quad C = 2.5 * \frac{T_p}{T} \quad \dots (2)$$

$$T > T_L \quad C = 2.5 * \frac{T_p T_L}{T^2} \quad \dots (3)$$

Posteriormente, es posible construir el espectro de respuesta inelástico usando un factor de reducción de respuesta sísmica en función al sistema estructural de la edificación.

La aceleración de respuesta espectral se obtiene de la ecuación:

$$S_a = \frac{Z \cdot U \cdot C \cdot S}{R} \cdot g \quad \dots (4)$$

Donde:

Sa= Aceleración espectral.

Z= Factor de zona.

U= Factor de Uso.

C= Factor de amplificación sísmica.

S= Factor de suelo.

R= Coeficiente de reducción de fuerza sísmica.

g= Aceleración de la gravedad

El coeficiente “R” puede ser obtenido de la siguiente tabla:

Figura 17. Valores para el factor de reducción de fuerzas sísmicas.

<b>SISTEMAS ESTRUCTURALES</b>	
<b>Sistema estructural</b>	<b>Coeficiente Básico de Reducción R</b>
<b>Acero:</b>	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	7
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	6
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	8
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	6
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
<b>Concreto Armado:</b>	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
<b>Albañilería armada o confinada</b>	3
<b>Madera (por esfuerzos admisibles)</b>	7

Nota: SENCICO (2020)

#### **2.2.4.2 Espectro objetivo**

De acuerdo con el ASCE (2021), el espectro objetivo “target response spectrum” es usualmente el espectro calculado con procedimientos de estudios de riesgo uniforme, el cual es computado para un determinado nivel de peligro con la envolvente de los resultados de un análisis de peligro sísmico considerando una probabilidad de excedencia, como el visto en el ítem 2.2.4.1 del presente estudio.

El espectro objetivo es usado para la selección de registros sísmicos cuando se va a aplicar un análisis dinámico no lineal.

#### **2.2.5 Modificación de registros sísmicos**

ASCE 7-22(2021) indica que existen dos procedimientos para modificar registros sísmicos de manera que sean compatibles con el espectro objetivo. El primero es a través del escalamiento de amplitudes y el segundo es el ajuste espectral.

##### **2.2.5.1 Escalamiento de amplitudes**

Básicamente, este método consiste en aplicar un solo factor de escala a todo el registro sísmico de manera que la variación en la energía del sismo con el periodo estructural encontrado en el registro original se mantenga. El escalamiento de amplitudes preserva la variabilidad registro – registro, aunque los registros individuales que son ajustados bajo este método pueden significativamente exceder la respuesta del espectro objetivo en algunos periodos, lo que puede tender a exagerar la importancia de la respuesta de algún modo superior de algunas estructuras. Un factor clave al emplear esta metodología es que los registros sísmicos a escalar hayan sido registrados en estaciones sísmicas ubicadas en un suelo similar al del espectro objetivo.

Al respecto, Abrahamson, N. et al (2012) realizó una evaluación estructural de estructuras de concreto armado usando análisis dinámico no lineal. Comparó los resultados de derivas de entrepiso usando el escalamiento de amplitudes y el ajuste

espectral de registros sísmicos, encontrando que el ajuste espectral es generalmente más estable que el otro método en términos de sesgo y dispersión, siendo consecuentemente más preciso. No obstante, Mendo (2015) sobre el método de ajuste espectral indica que *“se generan registros poco realistas, ya que los registros se modifican en forma significativa perdiendo el contenido de frecuencias característico de cada registro, resultando en el mismo contenido de energía para todos los registros”*. Asimismo, señala que no es un método apropiado para los procesos de diseño donde la variabilidad debe ser considerada (Ibíd, pp.88, 2015).

#### **2.2.5.2 Ajuste espectral**

De acuerdo ASCE 7-22 (2021) el ajuste espectral de registros sísmicos es un proceso que permite ajustar el registro de aceleraciones leído en una estación sísmica para que representen el peligro sísmico del lugar donde la estructura a evaluar se encuentra. Es decir, hace compatible el espectro de respuesta del acelerograma que se tiene, con las aceleraciones máximas esperadas en la zona de evaluación.

Este método permite reducir el número de registros sísmicos que son necesarios ejecutar en un análisis dinámico debido a la menor variabilidad en la respuesta promedio que generan. Como señala Abrahamson (2010):

*“Un beneficio adicional importante del enfoque de ajuste espectral es que los criterios para seleccionar la serie temporal inicial no son tan estrictos como los del enfoque de escala. Por ejemplo, si el movimiento de suelo de diseño es para las condiciones del sitio de roca, se pueden usar series de tiempo iniciales en sitios de suelo profundo porque el proceso de coincidencia espectral corregirá las diferencias en el contenido de frecuencia en sitios de suelo y roca. Adoptar el enfoque de coincidencia espectral, por lo tanto, da como resultado más opciones para la selección inicial de series de tiempo en comparación con el enfoque de escalado”*.

### **2.2.5.3 Métodos de ajuste espectral con fragmentos de onda en el dominio del tiempo**

De las metodologías empleadas para el ajuste espectral de acelerogramas, el método de ajuste espectral con dominio en el tiempo es la de mayor uso. Este método está basado en añadir fragmentos de onda al registro sísmico original o candidato con la finalidad de ajustar su espectro a un espectro objetivo (Macedo, 2013). Este procedimiento es más complicado que el ajuste espectral en el dominio de la frecuencia pero tiene buenas propiedades de convergencia y preserva el carácter no estacionario del registro de aceleraciones inicial.

En esta investigación se empleó la propuesta de Al Atik, L. y Abrahamson, L. (2010) para un ajuste espectral no estacionario "*Nonstationary Spectral Matching*". Según los autores, un importante beneficio de este procedimiento es que el criterio para la selección de registros sísmicos deja de ser necesariamente riguroso debido a las propiedades de convergencia del registro ajustado. Por ejemplo, si el espectro de diseño es construido para condiciones de sitio de roca, registros sísmicos en suelo profundo pueden emplearse ya que el proceso de ajuste espectral no estacionario corregirá las diferencias en el contenido de frecuencia en ambos tipos de suelo.

El algoritmo para el ajuste espectral ha sido inicialmente propuesto por Lihanand and Tseng (1988) y luego mejorado por Al Atik, L. y Abrahamson, L. (2010). Según indican estos últimos una suposición fundamental en esta metodología es que el tiempo del pico de aceleración no cambia como resultado del ajuste de ondas "wavelet adjustment". Entonces si  $a(t)$  es la aceleración inicial del registro sísmico, el objetivo es modificar  $a(t)$  de manera que su espectro de respuesta calculado coincida con el espectro objetivo en todo el rango de frecuencias mientras mantiene series de tiempo de velocidad y desplazamiento realistas.



Así, según Al Atik, L. y Abrahamson, L. (2010), la diferencia entre el espectro objetivo y el espectro del registro sísmico a cierta frecuencia ( $\omega_i$ ) y amortiguamiento ( $\beta_i$ ) denominado el misfit espectral está dado por:

$$\Delta R_i = (Q_i - R_i)P_i \quad \dots (5)$$

Donde  $Q_i$  es el valor espectral objetivo,  $R_i$  es el valor espectral del registro sísmico y  $P_i$  es la polaridad del valor pico de respuesta del oscilador.  $P_i$  es igual a 1 si la respuesta máxima del oscilador es positiva y  $P_i$  es igual a -1 si la respuesta máxima del oscilador es negativa.

Asumiendo que el tiempo del pico de respuesta de oscilador,  $t_i$ , no será perturbado por adicionar un pequeño ajuste a  $a(t)$ , el método básico es determinar el ajuste del registro sísmico,  $\delta a(t)$ , de manera que la respuesta del oscilador desde  $\delta a(t)$  en un tiempo  $t_i$  es igual que  $\Delta R_i$  para todo  $i$ .  $\delta a(t)$  puede ser escrito como:

$$\delta a(t) = \sum_{j=1}^N b_j f_j(t) \quad \dots (6)$$

Donde  $f_i(t)$  es un grupo de funciones de ajuste,  $b_j$  es el set de amplitudes de las funciones de ajuste, y  $N$  es el número total de puntos espectrales (pares de frecuencia y amortiguamiento) a ajustar. La respuesta de aceleración de  $\delta a(t)$  para una frecuencia  $\omega_i$  y un amortiguamiento  $\beta_i$  en un tiempo  $t_i$  es dado por:

$$\delta a(t) = \int_0^{\infty} \delta a(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad \dots (7)$$

Donde  $h_i(t)$  es la aceleración de impulso de la función de respuesta para un oscilador de un grado de libertad con una frecuencia  $\omega_i$  y amortiguamiento  $\beta_i$  y  $\tau$  es el parámetro de la integral. Sustituyendo la ecuación 6 en la ecuación 7 se tiene:

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j \int_0^{\infty} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad \dots (8)$$

El impulso de aceleración de la función de respuesta está dado por:

$$h_i(t) = \frac{-\omega_i}{\sqrt{1 - \beta_i^2}} \exp(-\omega_i \beta_i t) \left[ (2\beta_i^2 - 1) \text{sen}(\omega'_i t) - 2\beta_i \sqrt{1 - \beta_i^2} \cos(\omega'_i t) \right] \dots (9)$$

Donde:

$$\omega'_i = \omega_i \sqrt{1 - \beta_i^2} \quad \dots (9)$$

Y  $h_i(t) = 0$  para  $t < 0$ . Siendo  $c_{ij}$  la respuesta en el tiempo  $t_i$  para el  $i$ th frecuencia y amortiguamiento resultado de la función de ajuste  $f_j(t)$ . Luego:

$$c_{ij} = \int_0^{t_i} f_j(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \quad \dots (10)$$

Substituyendo la ecuación 13 en la ecuación 10, tenemos:

$$\delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j c_{ij} \quad \dots (11)$$

Si la respuesta de la serie de tiempo ajustada  $\delta R_i$  es igual que el misfit espectral  $\Delta R_i$ , luego:

$$\Delta R_i = \sum_{j=1}^N b_j c_{ij} \quad \dots (12)$$

La amplitud de cada onda usada en el ajuste es determinada por:

$$b = C^{-1} \delta R \quad \dots (13)$$

Donde  $C$  es la matriz cuadrada con elementos describiendo la amplitud de cada respuesta de un grado de libertad al tiempo que la respuesta necesita ser ajustada bajo la acción de cada onda.

Dado  $b_j$ , la serie de tiempo de ajuste,  $\delta a(t)$ , puede ser computada usando la ecuación 8. La nueva serie de tiempo ajustada por la primera iteración está dada por:

$$a_1(t) = a(t) + \gamma \delta a(t) \quad \dots (14)$$

Donde  $\gamma$  es un parámetro de relajación (entre 0 y 1) para amortiguar el ajuste. En la segunda iteración, el algoritmo se repite usando el registro sísmico (serie de tiempo) ajustado,  $a_1(t)$ , en lugar de  $a(t)$ . Las iteraciones son continuas hasta que se alcanza la deseada precisión del ajuste espectral.

La clave para mantener las propiedades no estacionaras del registro sísmico es la selección de la función de ajuste  $f_j(t)$ . Esta función debe ser seleccionada para obtener un espectro realista compatible con la aceleración de la serie de tiempo. La estabilidad numérica y la velocidad del algoritmo deben ser consideradas en la función de ajuste.

Para que el método funcione correctamente, la sincronización de  $f_j(t)$  debe ser tal que la respuesta de  $f_j(t)$  está en fase con el pico de aceleración de  $a(t)$ . Para una velocidad numérica,  $f_j(t)$  debe ser seleccionada tal que los elementos de  $C$  dados por la integral en la ecuación 13 puedan ser calculados analíticamente. Para una estabilidad numérica, los términos de  $C$  deben ser lo más pequeños posible. La función de ajuste propuesta por Al Atik, L. y Abrahamson, L. (2010), se presenta a continuación.

Según los autores mencionados, la función de ajuste fue seleccionada tal que los elementos de la matriz de  $C$  puedan ser computados analíticamente. Por tanto, la función analítica consiste en una función coseno estrechada con una función gaussiana.

Esta función permite que los elementos de la matriz de C puedan ser calculados analíticamente asegurando velocidad, estabilidad y eficiencia de la solución.

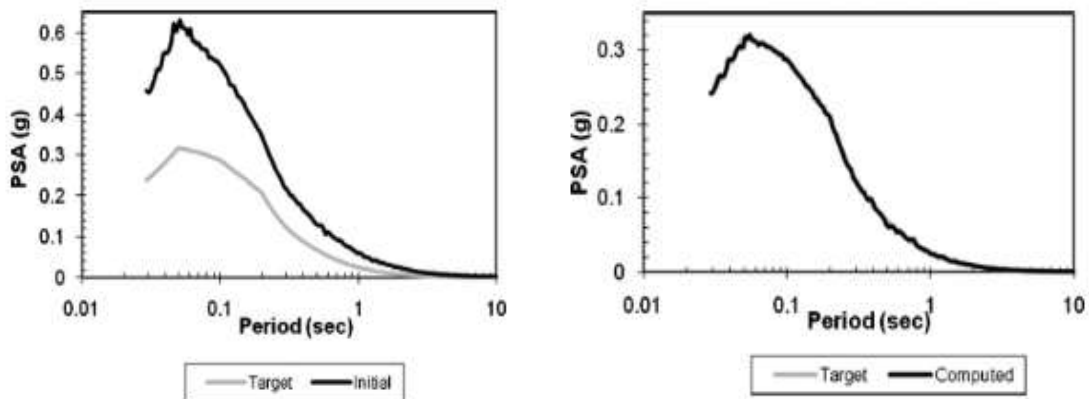
$$f_j(t) = \cos[\omega'_j(t - t_j + \Delta t_j)] \exp[-(\frac{t - t_j + \Delta t_j}{\gamma_j})^2] \dots (15)$$

Donde  $\gamma_j$  es un coeficiente de frecuencia dependiente usado para ajustar la duración de la función de ajuste.  $\gamma_j(f)$  ha sido desarrollado para asegurar una conicidad suave que incluiría varios ciclos en la función de ajuste y, por lo tanto, conduciría a velocidad y desplazamiento cero en todas las frecuencias.  $\gamma_j(f)$  Está dado por:

$$\gamma(f) = 1.178f^{-0.93} \dots (16)$$

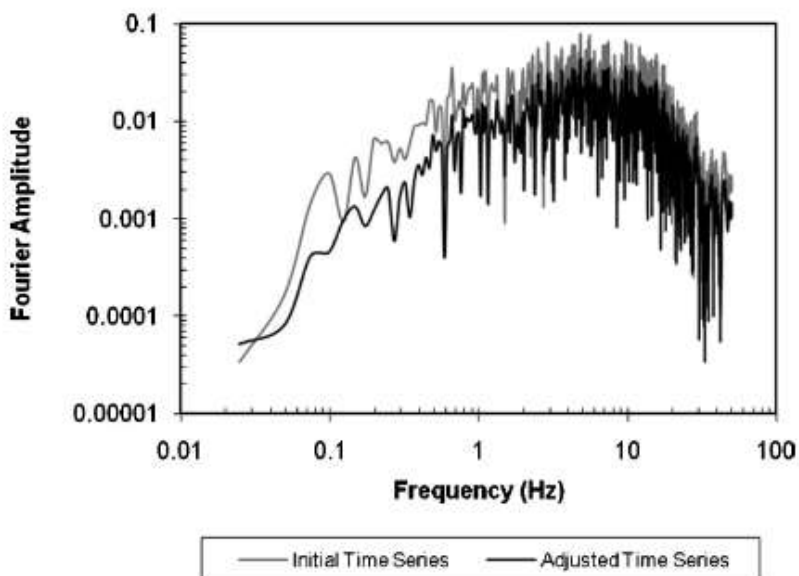
De esta manera se consigue ajustar espectralmente una serie de tiempo de aceleraciones (registro sísmico) sin alterar sustancialmente su contenido de frecuencias ni corromper sus series de tiempo de velocidad y desplazamiento. Siendo el registro ajustado compatible con el espectro de respuesta objetivo.

Figura 18. Ejemplo de ajuste espectral de un registro sísmico



Nota: A la izquierda el espectro de respuesta inicial comparada con el espectro de respuesta objetivo al que se desea ajustar. A la derecha el espectro de respuesta del registro sísmico ajustado espectralmente, prácticamente se superpone al espectro objetivo. Fuente: Al Atik, L. y Abrahamson, L. (2010).

Figura 19. Comparación en la serie de amplitudes entre el registro inicial y el registro ajustado espectralmente



*Nota: Se observa buena convergencia y similitud en ambos casos. Fuente: Al Atik, L. y Abrahamson, L. (2010).*

La metodología presentada está implementada en el software Seismomatch - Seismosoft (2019), es necesario cargar los registros de acelerogramas y definir un espectro de respuesta objetivo. Adicionalmente, se requiere definir el algoritmo de ajuste, el rango de periodos de ajuste espectral y la tolerancia requerida.

## 2.2.6 Propiedades no lineales de los materiales

### 2.2.6.1 Concreto armado

Según señalan Shoma, Z. y Anam, I. (2002), desde un punto de vista de análisis estructural y diseño, el concreto armado es un material compuesto muy complejo. Este material combina concreto y acero para formar un elemento que se comporta como un material elastoplástico que responde diferente a esfuerzos de compresión y tracción.

Asimismo, señalan que las complejidades en el comportamiento del concreto armado se manifiestan principalmente cuando la estructura es sometida a solicitaciones dinámicas. Es en este momento en que el concreto armado deja de comportarse dentro del régimen lineal e incursiona en el régimen no lineal.

La principal forma de representar las propiedades mecánicas o el comportamiento de la sección transversal de los elementos estructurales es por medio de los diagramas de esfuerzo deformación.

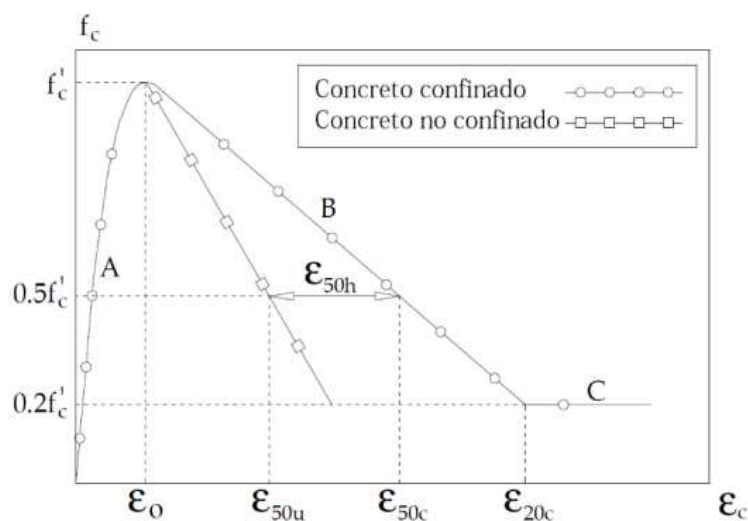
### Modelos constitutivos de esfuerzo deformación para el concreto

#### a) Keny y Park (1971)

Este modelo está basado en pruebas experimentales y se puede aplicar para concreto no confinado y confinado de secciones rectangulares o cuadradas. La curva de esfuerzo deformación se conforma por tres tramos (A, B y C). En el primer tramo el efecto del confinamiento aún no se presenta y la forma de la curva es similar al de un concreto simple, la cual normalmente se idealiza como una parábola de segundo grado.

El segundo tramo (B) se idealiza como una recta que empieza cuando el concreto alcanza su resistencia máxima y concluye cuando su resistencia se ha degradado en 80% o  $f_c = 0.20 f'_c$ . La pendiente del tramo B es función de factores relacionados con el confinamiento de la sección.

Figura 20. Curva de esfuerzo deformación según el modelo de Kent y Park (1971)



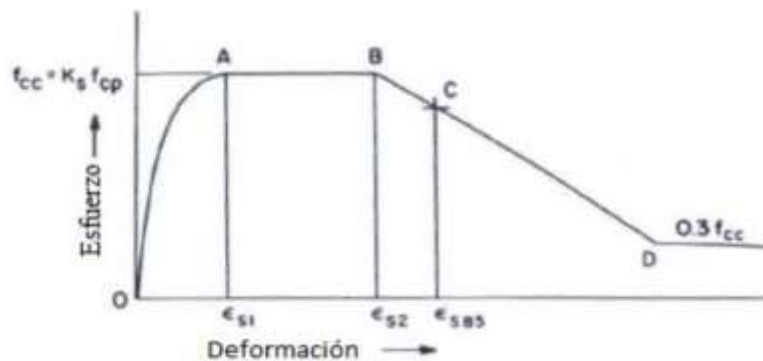
Nota: Moreno, N. (2017).

### b) Shein y Uzumeri (1982)

Este es un modelo analítico basado en resultados experimentales, el cual tiene como propuesta una curva de esfuerzo – deformación para concreto confinado. El modelo toma en cuenta la posición del refuerzo longitudinal, la separación del refuerzo transversal, la cuantía volumétrica y la configuración de los estribos.

La curva de esfuerzo deformación de este modelo consiste en una parábola de segundo orden con tres líneas rectas, esta curva puede ser definida completamente por cuatro parámetros. Una de las características importantes de este modelo es el concepto del concreto efectivamente confinado dentro del núcleo de concreto definido por la línea central de los estribos Sheikh, S. y Li, Y. (2006).

Figura 21. Curva de esfuerzo deformación según el modelo de Shein y Uzumeri (1971)

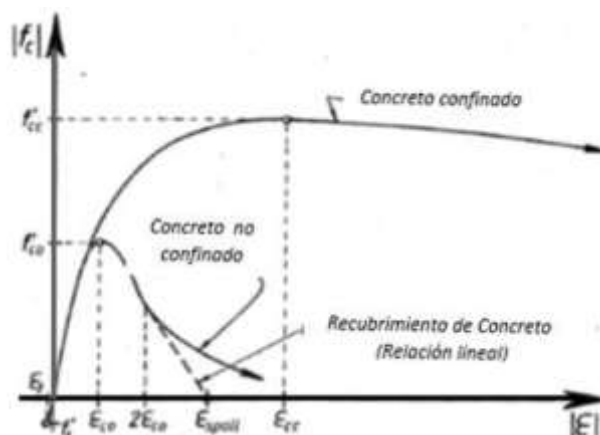


Nota: Sheikh, S. y Li, Y. (2006).

### c) Mander et al (1988)

El modelo de Mander et al (1988) se puede aplicar para concreto confinado y no confinado. Dicho modelo supone que el efecto del confinamiento incrementa la capacidad de deformación y la resistencia a la compresión del concreto. Así, la deformación unitaria de falla del concreto se presenta cuando se fractura el refuerzo transversal por lo que ya no puede confinar correctamente al núcleo de concreto. Debido a ello, las deformaciones transversales del núcleo de concreto tienden a ser demasiado grandes.

Figura 22. Comparación de curvas esfuerzo - formación de un concreto simple y uno confinado



Nota: Moreno, N. (2017).

## 2.2.6.2 Modelos de histéresis

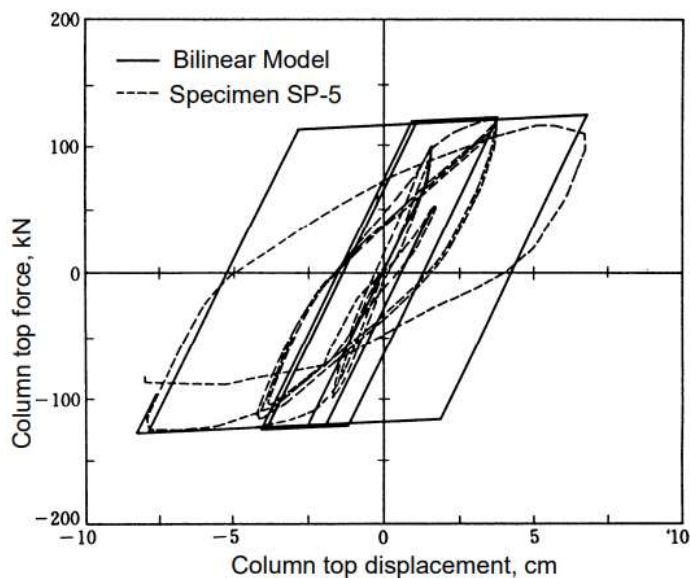
### a) Modelo bilineal

En los inicios del estudio del análisis dinámico no lineal, el modelo elástico – perfectamente plástico era usado por muchos investigadores. En este modelo el punto de respuesta se mueve sobre la línea de rigidez elástica antes de que se alcance el límite elástico. Después de ceder, la respuesta el punto se mueve sobre la línea perfectamente plástica hasta que tiene lugar la descarga Otani, S. (1980).

El modelo considera una pendiente positiva finita asignada a la rigidez posterior a la fluencia para tener en cuenta la característica de endurecimiento por deformación. Sin embargo, muchos autores consideran que el modelo bilineal no representa la degradación de las rigideces de carga y descarga con inversiones de amplitud de desplazamiento crecientes de una estructura, por lo que consideran que el modelo no es adecuado para un análisis no lineal refinado de una estructura de hormigón armado.



Figura 23. Modelo de respuesta bilineal para una columna de concreto armado



Nota: Otani, S. (1980).

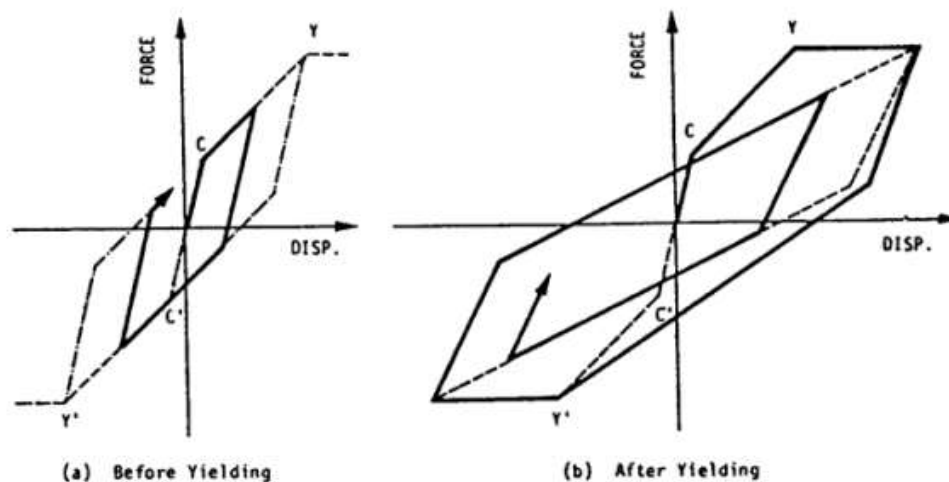
#### b) Modelo trilineal de degradación

Según Otani (1980), este es un modelo que logra simular las características dominantes de rigidez a la flexión del concreto armado, usado extensamente en Japón.

La curva primaria es de forma trilineal con cambios de rigidez en agrietamiento por flexión y fluencia. Hasta ceder, el modelo se comporta de la misma manera que el modelo bilineal, luego cuando la respuesta excede un punto de fluencia, el punto de respuesta sigue la parte de endurecimiento por deformación de la curva primaria. Una vez que la descarga toma lugar desde un punto de la curva primaria, este punto de descarga es considerado como un nuevo punto de fluencia.

El modelo se comporta de manera bilineal entre el punto de fluencia positivo y negativo con degradación de la rigidez proporcional a la ratio de la pendiente que conecta el nuevo punto de fluencia con el punto de fluencia inicial.

Figura 24. Modelo de degradación trilineal



Nota: Otani, S. (1980).

### c) Modelo de degradación de Takeda

Este modelo desarrollado por Takeda el al (1970) incluye cambios en la rigidez debido a agrietamiento o fluencia y también características debido al endurecimiento por deformación. Este modelo ha sido usado largamente en la estimación de la respuesta sísmica no lineal de estructuras de concreto armado.

Las principales condiciones bajo las que se sustenta este modelo de histéresis son:

- Condición 1: Una carga de agrietamiento  $P_{cr}$  no ha sido excedida en una dirección. La carga es revertida desde una carga  $P$  en la otra dirección. La carga  $P$  es más pequeña que la carga de fluencia  $P_y$ . La regla indica que la descarga sigue una línea recata desde la posición en la carga  $P$  hasta el punto de que representa la carga de agrietamiento en la otra dirección.
- Condición 2: Una carga  $P_1$  es alcanzada en una dirección en la curva primaria de manera que  $P_1$  es más grande que  $P_{cr}$ , pero más pequeña que la carga de fluencia  $P_y$ . La carga es luego invertida a  $-P_2$ , de manera que  $P_2 < P_1$ . La descarga es paralela a la curva de carga para esa mitad de ciclo.

- Condición 3: Una carga P1 es alcanzada en una dirección de manera que P1 es más grande que Pcr pero no más grande que la carga de fluencia Py. La carga luego es invertida a -P3 de forma que P3>P1. La descarga sigue una línea recta que une el punto de regreso y el punto de agrietamiento en la otra dirección.
- Condición 4: Uno o más ciclos de carga han ocurrido. La carga es cero. La curva de carga se construye al conectar el punto con carga cero y el punto máximo alcanzado en el ciclo previo.
- Condición 5: La carga de fluencia Py es excedida en una dirección. La curva de descarga sigue la pendiente dada por la siguiente ecuación:

$$kr = ky\left(\frac{Dy}{D}\right)^{0.4} \dots (17)$$

Donde:

kr: pendiente de la curva de descarga

ky: pendiente de la línea que une el punto de fluencia con el punto de agrietamiento en la otra dirección.

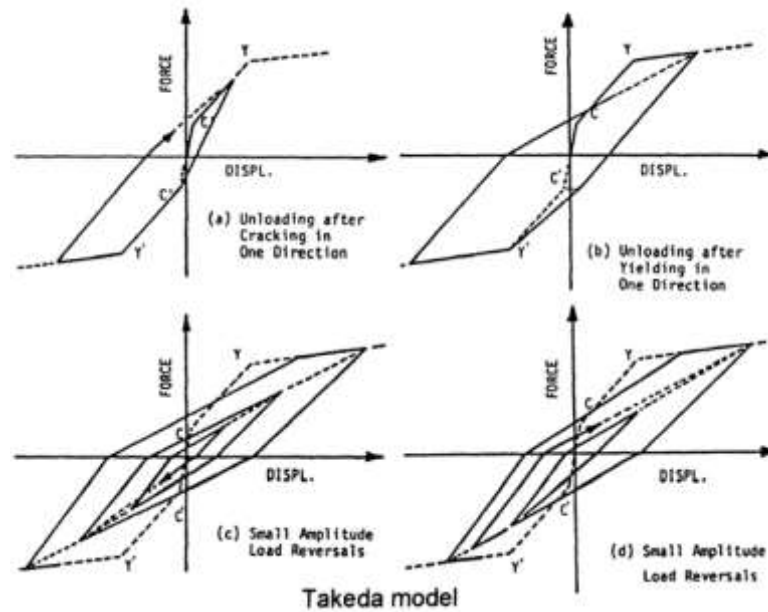
D: máxima deflexión en la dirección de la carga

Dy: deflexión en el punto de fluencia

- Condición 6: La carga de fluencia es excedida en una dirección, pero la carga de agrietamiento no es excedida en la dirección opuesta. La carga en la otra dirección continúa como una extensión de la línea de descarga hasta la carga de rotura. Entonces, la curva de carga apunta al punto de fluencia.
- Condición 7: Uno o más ciclos han ocurrido.

El modelo de Takeda (a) incluye cambios en la rigidez en la rotura por flexión y fluencia, (b) reglas de histéresis para bucles de histéresis internos dentro del bucle exterior y (c) degradación de la rigidez en la descarga con deformación. El punto de respuesta se mueve hacia el pico de uno de los ciclos de histéresis exterior.

Figura 25. Modelo de histéresis de Takeda con degradación



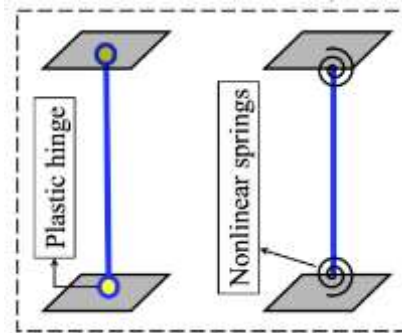
Nota: Otani, S. (1980).

### 2.2.6.3 Caracterización de la no linealidad en análisis estructural: Modelo de plasticidad concentrada

Los modelos de plasticidad concentrada se usan en estructuras para caracterizar el comportamiento no lineal de elementos de concreto armado, considerando la presencia de rótulas plásticas en los extremos de los elementos, las cuales tienen propiedades mecánicas propias del material de concreto armado. Este parámetro se define como la articulación ocasionada en una sección de un elemento estructural cuando ya sobrepasó su límite elástico y empieza a girar libremente.

Así, se puede decir que el comportamiento no lineal se representa por medio de zonas ubicadas en los extremos de los elementos, los cuales normalmente se asignan como una porción de la longitud total del elemento. Entonces, se establecen tres tramos en el elemento estructural: los dos que corresponden a las rótulas en los extremos y el tramo restante lineal elástico.

Figura 26. Esquema de modelo de plasticidad concentrada

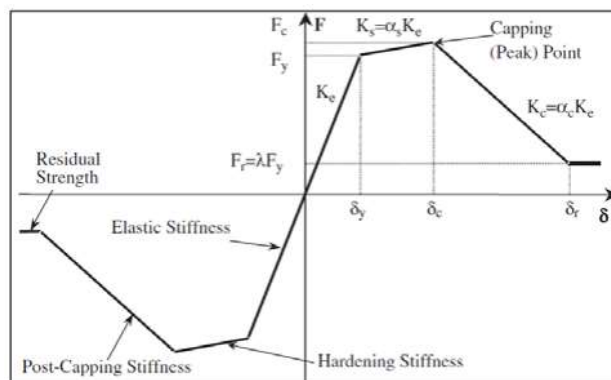


Nota: Roohi, M., Hernandez, E. y Rosowsky, D. (2020).

Adicionalmente, se considera que las rótulas plásticas son también un dispositivo de reducción de energía liberada una vez que la estructura pasa al rango plástico, lo cual resulta muy útil para estructuras que son hiperestáticas, ya que les otorga estabilidad más allá de su rango elástico

De acuerdo con Gonzales, O. (2020) el modelo de plasticidad concentrada se puede representar por medio de las curvas *backbone* con los diagramas momento curvatura o momento rotación. La conocida envolvente de *backbone* es una relación simple de fuerza deformación que forma la envolvente de las líneas de borde de cada uno de los ciclos de histéresis tomando así la degradación de la rigidez y la disipación de la energía en cada bucle de carga y descarga.

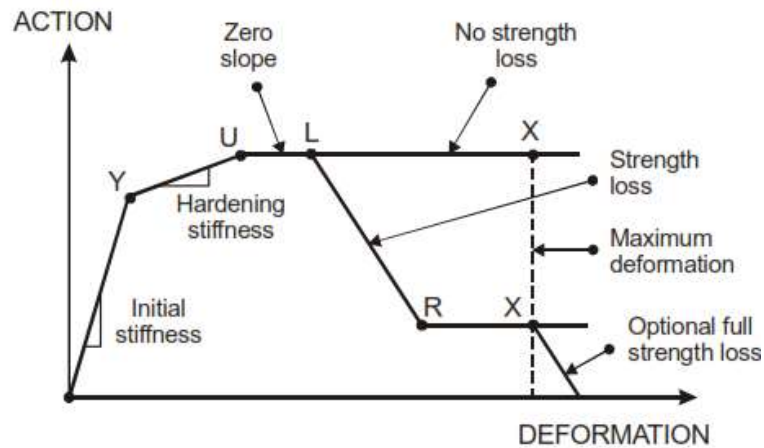
Figura 27. Envolvente de backbone para un modelo trilineal.



Nota: Gonzales, O. (2020)

En la presente investigación se emplea el modelo trilineal de histéresis para caracterizar las propiedades no lineales de rótulas plásticas en los elementos estructurales vigas y columnas. El software PERFORM 3D tiene la opción de considerar este modelo con pérdida de resistencia como se muestra:

Figura 28. Relación fuerza deformación



Nota: Computers and Structures (2006).

Donde el punto Y es el primer punto de ocurre la primera cedencia, donde inicia el comportamiento no lineal del elemento. Luego, el punto U es donde ocurre la resistencia última, donde se alcanza la máxima resistencia. En punto L el punto donde se llega al límite dúctil, donde inicia la pérdida de la resistencia. El punto R es la resistencia residual mínima alcanzada. Y el punto X es el punto límite de máxima deformación.

#### 2.2.6.4 Albañilería

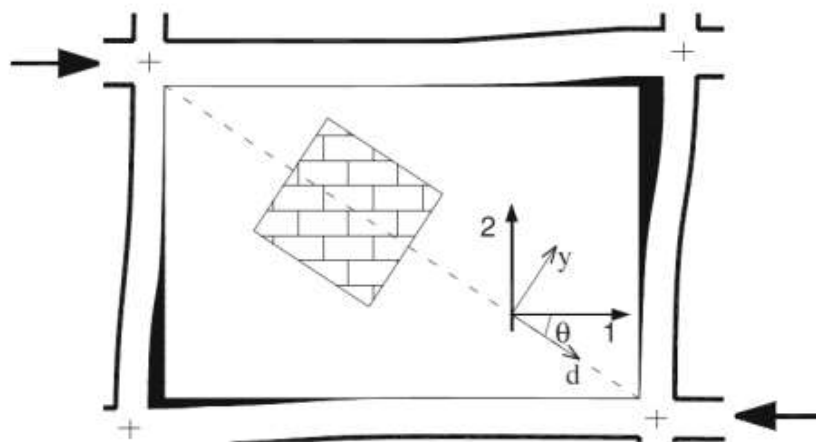
Según señala Martinelli, L. y Chesi, C. (2016) el reciente interés en métodos de análisis sísmico no lineal estático y dinámico requiere apropiadas estrategias de modelamiento basados en leyes constitutivas para los materiales estructurales que sean confiables y fáciles de usar. Asimismo, indican que “se debe prestar especial interés a los muros de albañilería por el rol principal que juegan en modificar la rigidez general, resistencia y ductilidad bajo excitaciones sísmicas”.

Una forma de representar la presencia de un muro de albañilería en un modelo estructural fue propuesta inicialmente por Polyakov (1960) citado en Martinelli, L. y Chesi, C. (2016), quien usando teoría elástica en varios estudios propuso considerar el efecto de muros como una arriostre equivalente (diagonal). Estos elementos representaban el panel soportando solo esfuerzos de compresión y cero esfuerzos de tensión. Posteriormente, se desarrollaron numerosas propuestas para mejorar este planteamiento.

Para desarrollar el modelo de diagonal equivalente que permite representar un muro de albañilería, se utilizó una de las propuestas más recientes de Calaveri L. et al (2013), donde si se considera que el comportamiento mecánico de los muros es similar a una placa ortotrópica homogénea, las propiedades elásticas en las dos principales direcciones ortogonales pueden ser usadas para derivar las propiedades elásticas alrededor de la dirección diagonal.

Las propiedades principales empleadas son el módulo de elasticidad, el módulo de corte y la ratio de Poisson.

*Figura 29. Esquema de compresión de muros de albañilería a lo largo de la dirección diagonal.*



*Nota: Calaveri L. et al (2013).*

Asumiendo que los ejes ortogonales van en la dirección 1 y 2, el módulo de elasticidad  $E_d$  y la ratio de Poisson  $v_d$  en la dirección diagonal rotado un ángulo  $\Theta$  desde el eje 1, puede ser evaluado por las siguientes expresiones:

$$\frac{1}{E_d} = \frac{1}{E_1} (\cos\theta)^4 + \left[ \frac{1}{G_{12}} - \frac{2v_{12}}{E_1} \right] (\sen\theta \cos\theta)^2 + \frac{1}{E_2} (\sen\theta)^4 \dots (18)$$

$$v_d = E_d \left[ \frac{v_{12}}{E_1} ((\sen\theta)^4 + (\cos\theta)^4) - \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - \frac{1}{G_{12}} \right] (\sen\theta \cos\theta)^2 \right] \dots (19)$$

Donde los números en los subíndices señalan las direcciones en de las que se toman los parámetros. De esta manera, se puede obtener el valor del módulo de elasticidad y la ratio de Poisson en cualquier dirección incluyendo en la dirección diagonal.

La gráfica envolvente que representa el modelo constitutivo de fuerza desplazamiento para caracterizar las propiedades no lineales de la diagonal equivalente se define como una gráfica trilineal que no considera resistencia a tensión, según la propuesta de Cavaleri et al (2013). Así, la rigidez inicial está definida por  $K_1$  calculada como:

$$K_1 = \frac{E_d t w}{d} \dots (20)$$

Mientras que la resistencia en el límite elástico  $F_1$  está definida como una función con parámetro  $\alpha$  como sigue:

$$F_1 = \alpha F_2 \dots (21)$$

La rigidez en el rango post elástico  $K_2$  está relacionada con el parámetro  $\beta$  como sigue:

$$K_2 = \beta K_1 \dots (22)$$

El desplazamiento en el límite elástico y resistencia pico está directamente identificado por:



$$\delta_3 = \frac{F_1}{K_1} \dots (23)$$

$$\delta_2 = \delta_1 + \frac{(F_2 - F_1)}{K_2} \dots (24)$$

$$F_3 = 0.7F_2 \dots (25)$$

La línea de ablandamiento se linealiza al unir los puntos  $F_2 - \delta_2$  y  $F_3 - \delta_3$ , donde  $\delta_3$  es obtenido por la siguiente expresión:

$$\delta_3 = \frac{1}{\zeta} \log \left[ \frac{F_2}{F_3} e^{\zeta \delta_2} \right] \dots (26)$$

La fuerza pico  $F_2$  de la diagonal equivalente es determinada como una función de la resistencia al corte promedio del panel  $f_{v0m}$  como sigue:

$$F_2 = f_{v0m} t \bar{d} \dots (27)$$

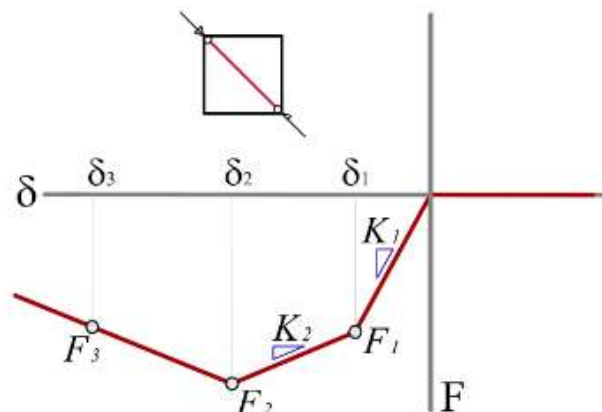
En donde  $\bar{d}$  representa la dimensión longitudinal de la diagonal del panel, y es introducida para considerar una reducción en la resistencia al corte de la forma del panel. La dimensión ideal de  $\bar{d}$  es calculada como una fracción de la longitud efectiva de la diagonal  $d$  del panel afectada por un factor de reducción  $\Psi$ .

$$\bar{d} = \Psi d \dots (28)$$

Donde  $\Psi$  es obtenido con:

$$\Psi = \frac{h\sqrt{2}}{\sqrt{(h^2 + l^2)}} \dots (29)$$

Figura 30. Modelo trilineal de fuerza desplazamiento



Nota: Cavaleri et al (2013).

## 2.3 Marco conceptual

### 2.3.1 Espectro de respuesta y espectro objetivo

Los espectros sísmicos de respuesta son las representaciones gráficas de los valores máximos de las respuestas de varios sistemas de un grado de libertad con diferentes periodos  $T$  y con el mismo amortiguamiento  $\zeta$ . Las respuestas del sistema pueden ser velocidad, desplazamiento y aceleración. Para simplificar las relaciones entre estas magnitudes se han definido los términos pseudo velocidad  $Psa$  y pseudo aceleración  $Psa$ . El valor de  $Psa$  permite calcular de forma directa el cortante basal.

El espectro objetivo se denomina al espectro que define el peligro sísmico del área de estudio y hacia el cual se va a escalar los acelerogramas.

### 2.3.2 Análisis Tiempo Historia

El análisis tiempo historia es un proceso ordenado de un análisis paso por paso de la respuesta dinámica de la estructura donde en cada intervalo de tiempo la carga puede variar. (Admuthe, 2018). Este procedimiento emplea como demanda en la estructura un registro sísmico que al aplicarlo a la estructura va a seguir una historia de disipación de

energía dependiendo de los contenidos de frecuencias y amplitudes de aceleración. De tal forma que brinda una respuesta estructural que depende del desarrollo del sismo.

### 2.3.3 Derivas de entrepiso

Es el desplazamiento relativo de cada nivel de piso respecto a su altura. Los datos de derivas y desplazamientos serán obtenidos de las respuestas estructurales luego de someter a los modelos matemáticos de las edificaciones a sismos y réplicas. Vielma (2014) define las derivas de entrepiso como:

$$\delta_i = \frac{(\Delta_i - \Delta_{i-1})}{H_i - H_{i-1}} \quad \dots (30)$$

Donde:

$\delta_i$  = deriva de entrepiso en el nivel  $i$

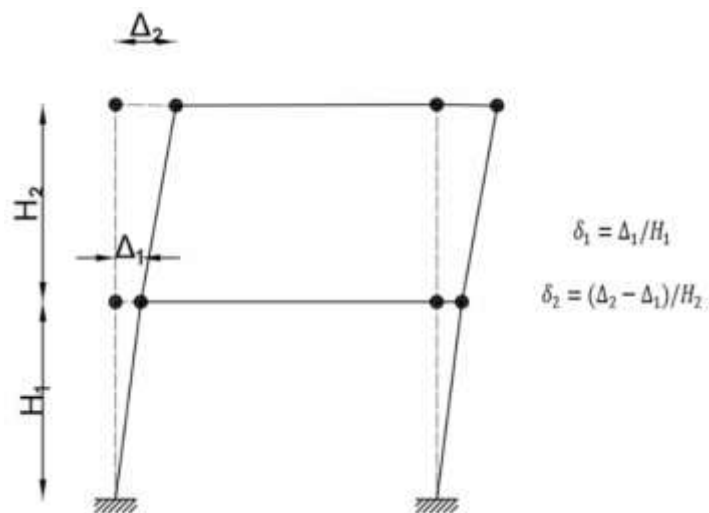
$\Delta_i$  = desplazamiento lateral en el nivel  $i$

$\Delta_{i-1}$  = desplazamiento lateral en el nivel  $i-1$

$H_i$  = altura del nivel  $i$

$H_{i-1}$  = altura del nivel  $i-1$

Figura 31. Representación de deriva de entrepiso



Nota: Skyciv (2022).

### 2.3.4 Índice de Daño

El índice de daño es una medida del daño ocasionado en una edificación, tiene un valor de cero cuando la estructura no ha sufrido ningún daño y un valor de 1 cuando la estructura colapsa. El índice de Park-Ang (1988) es uno de los índices de daño más usados en la literatura debido a que combina las deformaciones máximas y la energía histerética disipada.

$$DI = \frac{x_m}{x_u} + \beta_c \frac{e(T)}{q_y x_u} \quad \dots (31)$$

Donde  $x_m$  es la deformación máxima del elemento (capacidad),  $x_u$  es la deformación última (demanda),  $\beta_c$  es el parámetro de degradación del material (0.05-0.20),  $q_y$  es el esfuerzo de fluencia y  $e(T)$  es la energía histerética disipada. Esta metodología para calcular el índice de daño en edificaciones de concreto armado es muy utilizada actualmente por diversos investigadores alrededor del mundo.

## 2.4 Definición de términos básicos

- **Análisis dinámico no lineal**

Es un tipo de análisis en el cual se considera la respuesta no lineal de los materiales.

Es así que los esfuerzos sobrepasan la fluencia o límite elástico.

- **Sismo principal**

El sismo principal es el terremoto más grande de una secuencia, a veces precedido por uno o más sismos previos, y casi siempre seguido por muchas réplicas. Liu, M. y Stein, S. (2011)

- **Réplica sísmica**

Las réplicas son terremotos que siguen al mayor impacto de una secuencia de terremotos. Son más pequeños que el amortiguador principal y están a una distancia de 1-2 longitudes de ruptura del amortiguador principal. Las réplicas pueden continuar durante un período de semanas, meses o años. En general, cuanto más grande es el sismo principal, más grandes y numerosas son las réplicas, y más durarán. Riga, G. y Balocchi, P. (2017).

- **Ajuste espectral**

Es una técnica usada en la ingeniería estructural para obtener acelerogramas para los que el espectro de respuesta es compatible con un espectro objetivo del peligro sísmico local. Estos acelerogramas son usados para calcular la respuesta de las estructuras, usualmente por encima del límite elástico de las mismas. Al Atik, L. y Abrahamson, L. (2010)

- **Acelerograma**

Es una representación temporal de la aceleración que experimenta el suelo en un determinado punto durante un evento sísmico. Los acelerogramas se caracterizan por ser altamente irregulares y oscilatorios, con pequeñas amplitudes iniciales que crecen rápidamente hasta alcanzar los valores máximos y decrecer igualmente rápido hasta que se detiene el movimiento. Herraiz (2006)

- **Espectro objetivo**

Espectro que corresponde al peligro sísmico local, para el cual los acelerogramas serán escalados usando el método del ajuste espectral. Al Atik, L. y Abrahamson, L. (2010).

## **CAPITULO III**

### **3 PLANTEAMIENTO DE LAS HIPÓTESIS Y VARIABLES**

#### **3.1 Hipótesis**

##### **3.1.1 Hipótesis general**

- Las réplicas sísmicas tienen el efecto de aumentar las derivas y el índice de daño en un promedio de 10% para todos los sismos aplicados en la I.E. N°82030 Fernández Gil, en la localidad de Pariamarca, Cajamarca.

#### **3.2 Variables o categorías**

##### **Variable Independiente**

- Réplicas sísmicas

##### **Variables dependientes**

- Derivas de entrepiso
- Índice de daño

#### **3.3 Operacionalización de los componentes de la hipótesis**

HIPOTESIS	DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE LAS VARIABLES	VARIABLES	DEFINICIÓN OPERACIONAL	
			INDICADORES	FUENTE O INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS
Las réplicas sísmicas tienen el efecto de aumentar las derivas y el índice de daño en un promedio de 10% para todos los sismos aplicados en la I.E. N°82030 Fernández Gil, en la localidad de Paríamarca, Cajamarca.	Eventos sísmicos secundarios que ocurren después de un evento sísmico principal. Se puede caracterizar por acelerogramas espectralmente ajustados al peligro sísmico de la zona.	Replicas sísmicas	Tiempo	Registros sísmicos
	Diferencia normalizada de los desplazamientos laterales totales entre dos niveles consecutivos.	Derivas de entrepiso	Desplazamientos	Cálculo estructural
	Parámetro que define el nivel de daño alcanzado por una estructura durante un evento sísmico.	Índice de daño	Rotaciones máximas, energía disipada	Cálculo estructural

## CAPÍTULO IV

### 4 MARCO METODOLÓGICO

#### 4.1.1 Ubicación geográfica

La investigación se realizó en la ciudad de Cajamarca y el objeto de estudio se encuentra en la localidad de Pariamarca.

Figura 32. Ubicación espacial de la edificación a estudiar

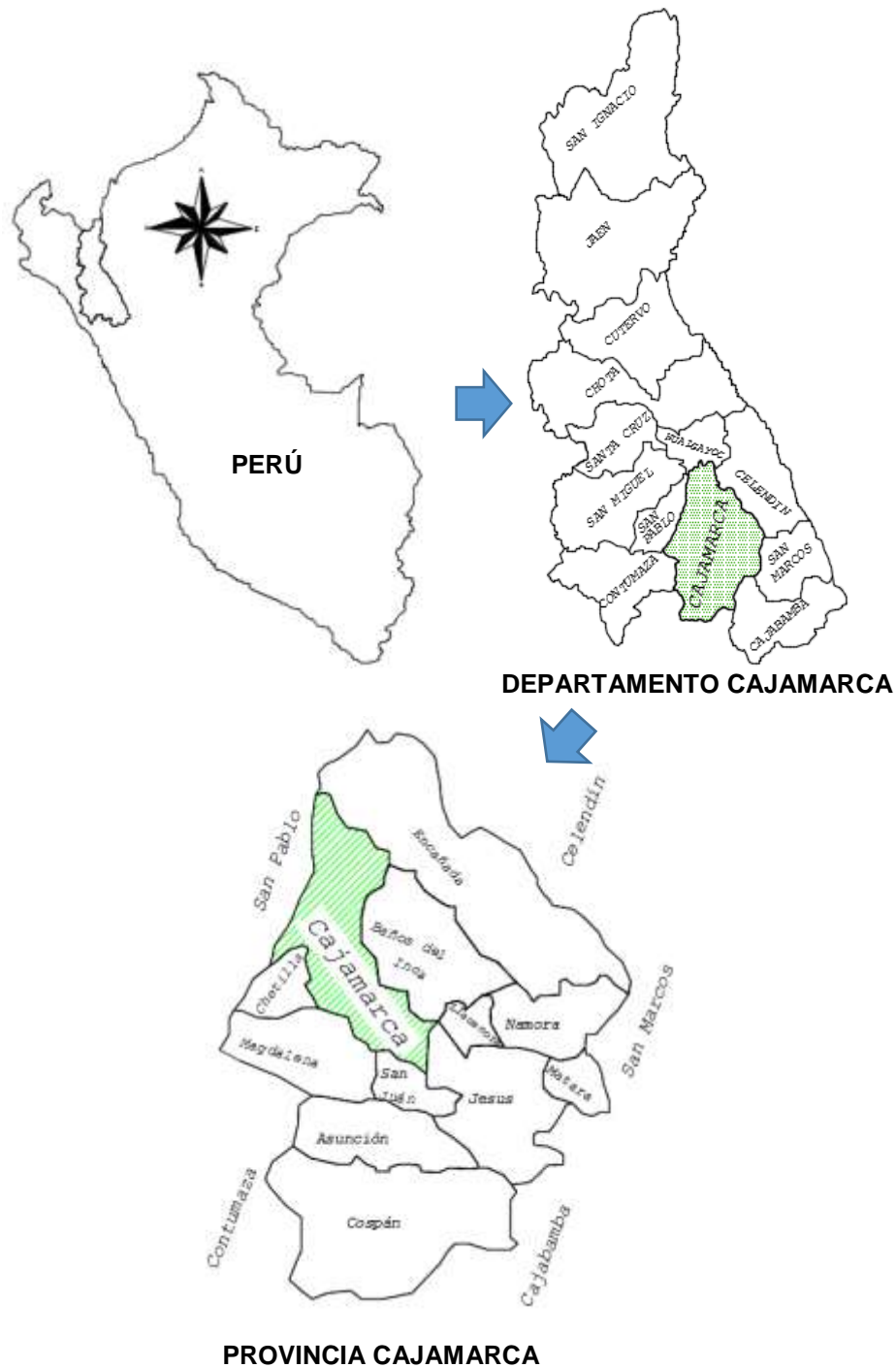
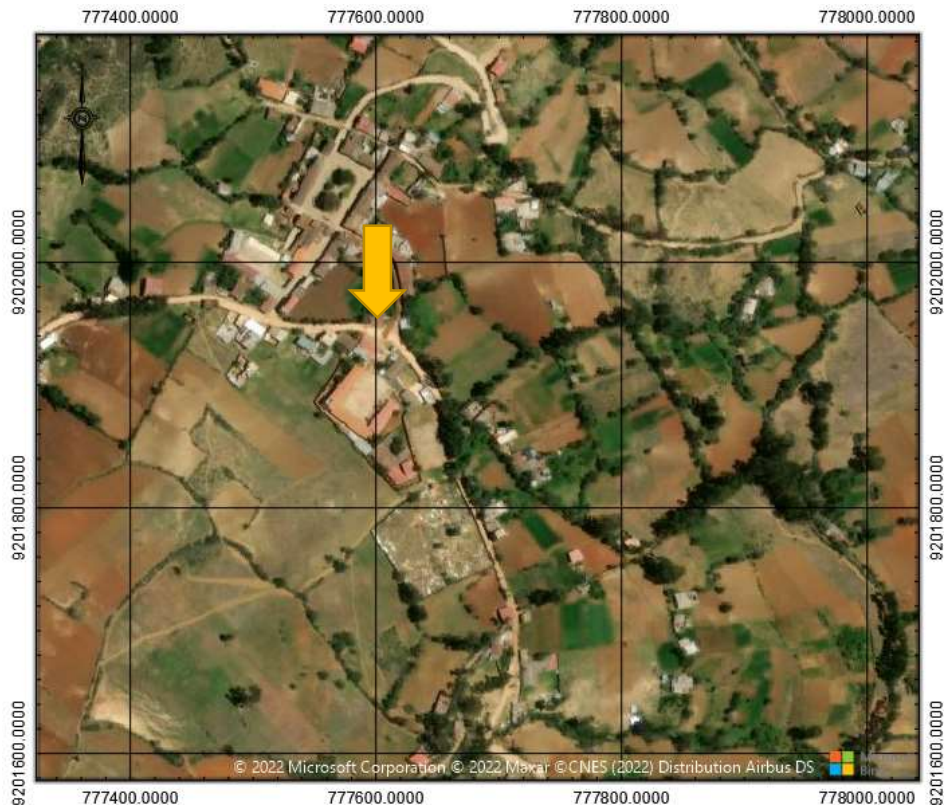




Figura 33. Ubicación de la edificación a estudiar.



Nota: Google Earth.

## 4.2 Diseño de la investigación

### 4.2.1 Propiedades mecánicas de los materiales

Para la resistencia a compresión del concreto se han realizado ensayos de esclerometría en concordancia con la norma técnica NTP 339.181 (2013) “Método de ensayo para determinar el número de rebote del concreto endurecido”. Es importante aclarar que la resistencia a la compresión es una variable que depende factores como el proceso constructivo y las especificaciones técnicas (tipo de cemento, agregados, agua, etc). En esta investigación, se ha realizado el ensayo de esclerometría con el objetivo de saber si se cumple la resistencia a compresión especificada en los planos  $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$  en vigas y columnas. Sobre este parámetro se ha considerado el siguiente esquema de la edificación que muestra las vigas y columnas donde se aplicó este método.

Figura 34. Esquema de vigas y columnas donde se aplicó el método de esclerometría. Ver anexo 1.

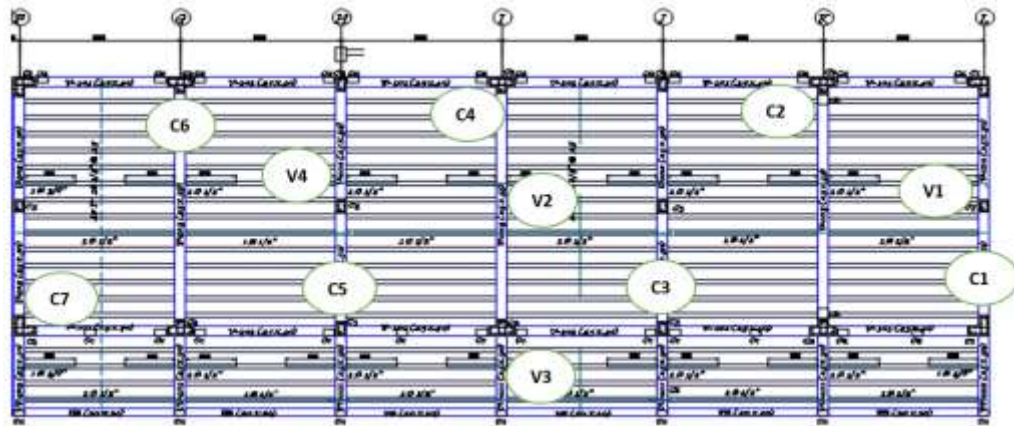


Tabla 1. Resultado de ensayo de esclerometría en columnas. Ver anexo 1.

NIVEL	COLUMNA	Nº DE PUNTOS	Nº REBOTE PROM	DESV. ESTÁNDAR	f'c
PRIMER NIVEL	C1	12	28.50	1.98	210.92
	C2	12	29.25	3.11	217.95
	C3	12	29.17	3.10	216.54
	C4	12	28.00	3.88	203.89
	C5	12	28.17	2.55	209.51
	C6	12	29.75	2.22	223.57
	C7	12	29.58	2.15	217.95
SEGUNDO NIVEL	C1	12	30.00	2.89	237.63
	C2	12	29.00	3.19	211.62
	C3	12	28.92	2.15	210.92
	C4	12	29.75	3.28	224.98
	C5	12	28.33	1.37	209.51
	C6	12	28.58	1.68	210.21
	C7	12	28.92	1.68	214.43

Tabla 2. Resultado de ensayo de esclerometría en vigas. Ver anexo 1.

NIVEL	VIGAS	Nº DE PUNTOS	Nº REBOTE PROM	DESV. ESTÁNDAR	f'c
PRIMER NIVEL	V1	12	28.17	1.85	210.92
	V2	12	28.58	3.23	211.69
	V3	12	28.83	1.95	214.43
	V4	12	29.17	2.82	222.87
SEGUNDO NIVEL	V1	12	28.33	1.56	212.32
	V2	12	28.75	2.34	213.73
	V3	12	28.92	2.15	215.14
	V4	12	29.75	3.28	228.49

#### 4.2.1.1 Acero en vigas y columnas

La cantidad de acero en vigas y columnas influye directamente en el esfuerzo de fluencia “fy” y el esfuerzo último “fu” así como en el desplazamiento último del diagrama momento curvatura del análisis seccional que ayuda a construir las rótulas plásticas para los elementos estructurales.

Cabe indicar que el diseño de la estructura se considera que cumple todos los criterios normativos que exigen los reglamentos peruanos, ya que, al ser una obra pública, el expediente técnico ha sido sometido a evaluación y aprobación para su ejecución. Por ello, no se hará una verificación del área de acero, pero sí se presenta el esquema y las áreas de acero por cada elemento estructural, los cuales también se pueden observar en los planos del Anexo 2.

Tabla 3. Esquema y distribución de acero en vigas. Ver anexo 2.

ELEMENTO	GRÁFICO	As Sup. Cm2	As. Inf. Cm2
V101 (0.25x0.40)		3.98	3.98
V102 (0.25x0.50)		3.98	3.98

ELEMENTO	GRÁFICO	As Sup. Cm2	As. Inf. Cm2
VV-101 (0.25x0.50)		5.97	3.98
VV-102 (0.25x0.50)		5.97	3.98
V - 201 (0.25x0.35)		3.98	3.98
V - 202 (0.25x0.40)		3.98	3.98
V - 202 (0.25x0.40)		5.97	3.98
V - 204 (0.25x0.35)		5.97	3.98

Tabla 4. Esquema y distribución de acero en columnas. Ver anexo 2.

ELEMENTO	GRÁFICO	Acero cm <sup>2</sup>
C1 (0.50x0.50x0.25)		21
C2 (0.60x0.40x0.25)		19.73
C3 (0.35x0.25)		15.92
C4 (0.35x0.25)		10.5
C5 (0.30x0.25)		11.94

Nota: Todas las columnas cumplen la cuantía mínima del 1%.

Considerando lo visto anteriormente, se tiene el resumen de propiedades mecánicas empleadas en el modelo estructural en el software Perform 3d.

Tabla 5. Principales propiedades de la institución educativa para el modelo estructural

	PROPIEDADES	I.E. FERNANDEZ GIL
$f_c$	Vigas (promedio)	216.20 kg/cm <sup>2</sup>
	Columnas (promedio)	215.50 kg/cm <sup>2</sup>
E	Vigas	220,556.12 kg/cm <sup>2</sup>
	Columnas	220,198.77 kg/cm <sup>2</sup>
	Peso unitario del concreto	2400 kg/m <sup>3</sup>
	Módulo de poisson	0.2
	Recubrimiento en vigas y columnas	4 cm
	Esfuerzo fluencia acero $f_y$	4200 kg/cm <sup>2</sup>
	Peso unitario del acero	7850 kg/m <sup>3</sup>
	E acero	21000000 Tn/m <sup>2</sup>

La cuantificación de las cargas a las que van a estar sometidos cada edificio se ha realizado tomando en cuenta la norma E.020: Cargas, del Reglamento Nacional de Edificaciones.

#### 4.2.2 Selección de registros sísmicos

En esta investigación se han empleado dos metodologías: el escalamiento de amplitudes y el ajuste espectral de registros de sismos para determinar las derivas e índice de daño de la estructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil considerando réplicas sísmicas.

Se han seleccionado siete señales sísmicas para ambas metodologías. Todos los sismos han sido obtenidos de las siguientes bases de datos:

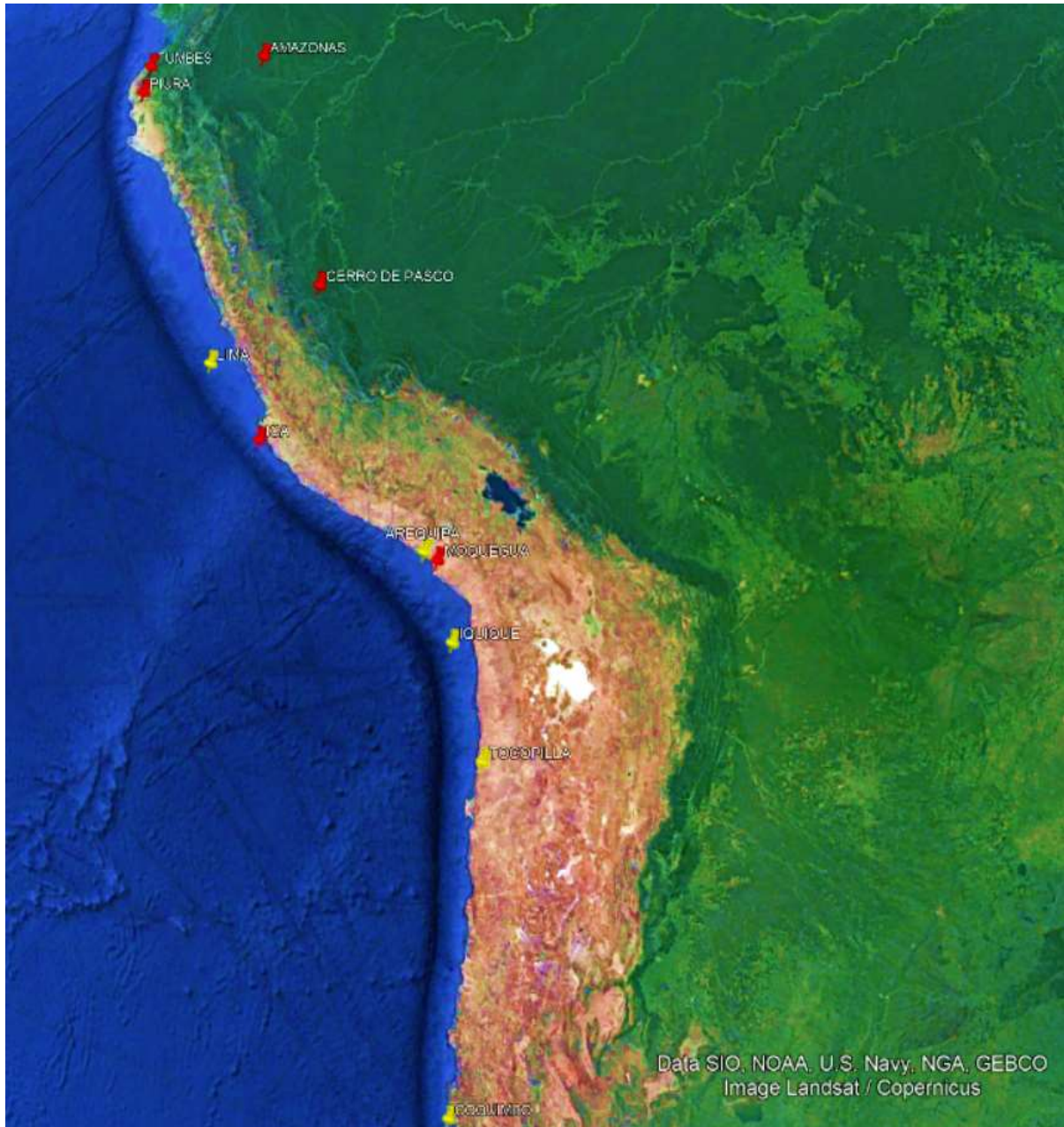
- CISMID Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de desastres.
- IGP Instituto Geofísico del Perú.

- Base de datos del Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile CSN.
- Base de datos del Center of Engineering Strong Motion Data (CESMD).
- Base de datos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile FCFM.

Para la selección iterativa de los registros de eventos sísmicos y réplicas se han considerado los siguientes criterios basados en los estudios presentados en antecedentes teóricos:

- Se ha considerado sismos registrados en estaciones con clasificación de suelo similar al suelo de Cajamarca (escalamiento de amplitudes).
- Señales sísmicas que tengan información histórica de registro de réplicas.
- Promedio de aceleración máxima del suelo mayor a 0.05g.
- Réplicas que ocurren en un lapso máximo de 60 días.
- Los sismos principales y las réplicas se han registrado en la misma estación sísmica.
- En sismos que tienen múltiples réplicas se ha seleccionado la de mayor magnitud.

Figura 35. Ubicación de sismos seleccionados



*Nota: Sismos seleccionados (en rojo) para el método de escalamiento de amplitudes y sismos seleccionados (en amarillo) para el método de ajuste espectral.*

En la siguiente tabla se presentan los sismos seleccionados:



Tabla 6. Registros sísmicos seleccionados para el procedimiento de escalamiento

N°	NOMBRE		Ubicación		Magnitud Mw	PROFUNDIDAD Km	Fecha	Hora UTC	Base de datos
			LAT	LONG					
1	Moquegua	Sismo Principal	-17.6	-71.3	4.8	25	18/03/2015	00:39:17	IGP
		Réplica	-	-71.33	4.6	25	19/03/2015	08:11:50	IGP
2	Ica	Sismo Principal	18.58	-76.44	5.2	40	8/08/2016	14:03:22	IGP
		Réplica	-	-75.25	4.7	22	8/08/2016	16:45:01	IGP
3	Amazonas	Sismo Principal	14.52	-77	7.5	131	28/11/2021	05:52:12	CISMID
		Réplica	-	-77.06	6.8	139	3/02/2022	10:58:55	CISMID
4	Tumbes	Sismo Principal	-4.44	-80.66	6.2	43	5/06/2017	06:34:09	CISMID
		Réplica	-4.49	-80.55	4	33	5/06/2017	12:39:41	CISMID
5	Piura	Sismo Principal	-4.17	-80.8	6.1	36	30/07/2021	12:10:18	CISMID
		Réplica	-4.89	-80.8	3.8	35	3/08/2021	01:31:21	CISMID
6	Cerro de pasco	Sismo Principal	-4.9	-74.77	6.1	15	13/08/2017	11:51:23	CISMID
		Réplica	10.76	-74.74	4.5	42	1/09/2017	11:56:44	CISMID
7	Arequipa	Sismo Principal	10.68	-71.9	5.2	11	30/04/2017	08:29:06	IGP
		Réplica	-	-71.96	4.5	12	30/04/2017	12:35:50	IGP

Tabla 7. Registros sísmicos seleccionados para el procedimiento de ajuste espectral

N°	NOMBRE		Ubicación		Magnitud Mw	PROFUNDIDAD Km	Fecha	Hora UTC	Base de datos
			LAT	LONG					
1	Arequipa	Sismo Principal	-17.4	-71.67	7.8	33	23/06/2001	20:33:00	CISMIO
		Réplica	-	-73.77	6.3	33	7/07/2001	09:39:05	CISMID
2	Coquimbo	Sismo Principal	16.08	-71.86	8.4	11	16/09/2015	22:54:28	CSN
		Réplica	-	-71.75	7.1	26	16/09/2015	22:59:15	CSN
3	Iquique	Sismo Principal	31.51	-70.91	8.2	38	1/04/2014	23:46:45	CSN
		Réplica	-	-70.44	7.6	27	3/04/2014	02:43:15	CSN
4	Lima	Sismo Principal	19.57	-77.98	7.9	13	3/10/1974	14:21:00	CISMID
		Réplica	-	-77.59	6.3	13	9/11/1974	12:59:54	CISMID
5	Tocopilla	Sismo Principal	12.52	-70.13	7.7	39	14/11/2007	15:40:18	RENADIC
		Réplica	-	-70.52	6	38	15/11/2007	15:05:15	RENADIC
6	Maule	Sismo Principal	22.42	-73.24	8.8	30	27/02/2010	03:34:08	RENADIC
		Réplica	-	-72.87	6.1	30	27/02/2010	07:30:30	RENADIC
7	Valparaíso	Sismo Principal	33.96	-71.87	7.8	33	3/03/1985	22:47:07	SMVDC
		Réplica	-	-71.62	7.2	37.8	9/07/1985	01:56:09	SMVDC

## Sismos considerados para el escalamiento de amplitudes

- Sismo de Moquegua del año 2015 con una profundidad de 25 km y una magnitud de 4.8, fue registrado en la estación sísmica de Ilo Moquegua del Instituto Geofísico del Perú<sup>1</sup>
- Sismo de Ica del año 2016 con una profundidad de 40 km y una magnitud de 5.3, fue registrado en la estación sísmica de Santo Domingo de Olleros del Instituto Geofísico del Perú.
- Sismo de Amazonas del año 2016 con una profundidad de 130 km y una magnitud de 7.5, fue registrado en la estación sísmica SCCHI de Gerencia Zonal Sencico – Chiclayo de la red sísmica del CISMID<sup>2</sup>.
- Sismo de Tumbes del año 2017 con una profundidad de 33 km y una magnitud de 6.2, fue registrado en la estación sísmica de SENCICO en Piura de la red sísmica del CISMID.
- Sismo de Piura del año 2017 con una profundidad de 36 km y una magnitud de 6.1, fue registrado en la estación sísmica de SENCICO en Piura de la red sísmica del CISMID.
- Sismo de Cerro de pasco del año 2017 con una profundidad de 15 km y una magnitud de 6.1, fue registrado en la estación sísmica de SENCICO en Huancayo de la red sísmica del CISMID.
- Sismo de Arequipa del año 2017, con una profundidad de 11 km y una magnitud de 5.2, fue registrado en la estación sísmica del IGP en Chuquibamba, Arequipa.

---

<sup>1</sup> <https://www.igp.gob.pe/servicios/aceldat-peru/reportes-registros-acelerometricos>

<sup>2</sup> <http://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/>

## Sismos considerados para ajuste espectral

- El sismo de Arequipa del año 2001 tuvo su epicentro en la zona sur del Perú y cerca de la línea costera, profundidad de 33 km. Afectó a toda la región sur del Perú, incluyendo las ciudades de Arica e Iquique en Chile y la Paz Bolivia. El terremoto dejó un saldo de 102 personas muertas, alrededor de 320 000 personas fueron afectadas, 17 500 casas se destruyeron además de otros años ocurridos. Los registros sísmicos fueron tomados de la página del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID<sup>3</sup>.
- El terremoto de Coquimbo del 2015 fue un sismo de contacto de las placas de Nasca y Sudamérica, cuyo epicentro se ubicó cerca de la localidad de Canela Baja a una profundidad de 11 km, afectando a muchas localidades de la región. Cabe indicar que el sismo se produjo a una profundidad de 11km. Los registros sísmicos fueron tomados del Centro Sismológico Nacional – Universidad de Chile<sup>4</sup>.
- El terremoto de Iquique fue un sismo de gran magnitud que afectó las zonas de Arica, Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. Según el Centro Sismológico Nacional (CSN), el epicentro estuvo a 94 km al noroeste de Iquique, en el mar chileno a una profundidad de 38 km. Fue el sismo más fuerte registrado en el año 2014 a nivel mundial. Los registros sísmicos fueron tomados del Centro Sismológico Nacional – Universidad de Chile<sup>5</sup>.
- El terremoto de Lima de 1974 tuvo el epicentro a 90km al suroeste de la capital afectando a Mala, Cañete, Chincha y Pisco a una profundidad de 12.8 km. Buena

---

<sup>3</sup> <http://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/>

<sup>4</sup> <http://evtdb.csn.uchile.cl/event/6c5752b76db0f46280949a79864bef6e>

<sup>5</sup> <http://evtdb.csn.uchile.cl/event/6c5752b76db0f46280949a79863b4d67>

parte de Lima antigua como el Rímac, Barranco, Chorrillos y El Callao sufrieron severos daños en su infraestructura. Cabe agregar que sólo en Lima se registraron 78 muertos y 2414 heridos, mientras que las pérdidas materiales se estimaron en 2700 millones de soles. Los registros sísmicos fueron tomados de del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres CISMID<sup>6</sup>.

- El sismo de Maule del 2010 afectó la zona sur de Chile y produjo un tsunami muy destructivo que asoló la costa de la región Maule, 115 km al noreste de Concepción, Chile, a una profundidad de 30.1 km. El terremoto ocasionó 512 muertos, 16 desaparecidos y 800 mil personas damnificadas, siendo gran causante de las muertes el tsunami. Los registros sísmicos fueron tomados de la página web de la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile<sup>7</sup>.
- El terremoto de Tocopilla del 2007 tuvo su epicentro entre las localidades de Quillagua y Tocopilla, su hipocentro estuvo a una profundidad de 38.9 km. Las ciudades de Tocopilla y María Elena fueron las más afectadas, quedando cerca de 15000 personas damnificadas, un centenar de heridos y dos fallecidos producto de los derrumbes durante el movimiento telúrico. Los registros sísmicos fueron tomados de la página web de la facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile<sup>8</sup>.
- El terremoto de Valparaíso sucedió en marzo de 1985 en la ciudad de Valparaíso, su hipocentro estuvo ubicado a una profundidad de 33.0 km. Este

---

<sup>6</sup> <http://www.cismid.uni.edu.pe/ceois/red/>

<sup>7</sup> <http://terremotos.ing.uchile.cl/registros/164>

<sup>8</sup> <http://terremotos.ing.uchile.cl/registros/123>

sismo generó grandes pérdidas económicas además de un total de 178 muertos, 2575 heridos y 85358 viviendas destruidas

#### **4.2.3 Intervalo de tiempo mínimo entre el sismo principal y su respectiva réplica.**

Para la definición del intervalo de tiempo entre el sismo principal y su réplica se empleó la propuesta de Roohollah, P., Sohelia, H. y Ali, M. (2021) para la estimación del tiempo mínimo de reposo de una estructura en función de la duración del evento sísmico y su periodo de vibración.

El criterio de los autores es que entre un evento sísmico principal y sus respectivas réplicas existe un intervalo de tiempo con cero aceleraciones en el que la estructura cesa su vibración debido a su amortiguamiento luego de terminado el sismo. Este intervalo puede ser desde segundos hasta días, sin embargo, en términos de optimización de análisis dinámico no lineal, es importante contar con el intervalo mínimo requerido (en segundos) para mejorar los tiempos de ejecución de análisis que, en función a la duración de las secuencias de sismos, suelen ser extensos.

Así, se empleará la expresión:

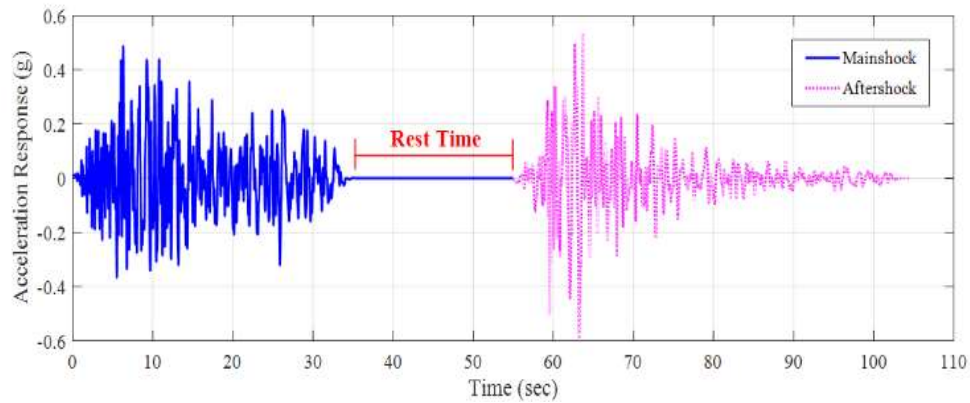
$$R = T_d [(21.8559T + 0.0258)(T_d^{-0.982}) + 0.0214] \dots (32)$$

Donde:

- $T_d$ = duración del evento sísmico en segundos.
- $T$ = periodo de vibración de la estructura

Para la estructura en estudio, de acuerdo al análisis modal, se tiene desplazamiento en las direcciones ortogonales X (EW) e Y (NS), con sus respectivos periodos de vibración.

Figura 36. Ilustración del intervalo de tiempo entre un sismo principal y su réplica.



Nota: Roohollah, P., Sohelia, H. y Ali, M. (2021)

Tabla 8. Periodos de vibración de la estructura modelada

SENTIDO	PERIODO (s)
EW	0.1774
NS	0.1505

De esta manera, se ha calculado el intervalo de tiempo mínimo requerido entre el sismo principal y su respectiva réplica para cada sentido.

Tabla 9. Intervalo de tiempo calculado entre sismo y réplica (ajuste espectral)

SISMO	Duración (s)	Intervalo calculado (S)	Intervalo asumido (s)
AREQUIPA 2001	115.00	6.3975	10
COQUIMBO 2015	125.00	6.6121	10
IQUIQUE 2014	155.00	7.2556	10
LIMA 1974	97.96	6.0317	10
MAULE 2010	158.14	7.3230	10
TOCOPILLA 2007	115.02	6.3979	10

Tabla 10. Intervalo de tiempo calculado entre sismo y réplica (escalamiento de amplitudes)

SISMO	Duración (s)	Intervalo calculado (s)	Intervalo asumido (s)
MOQUEGUA 2015	115	5.8045	10
ICA 2016	115	5.8045	10
AMAZONAS 2021	163.09	6.8358	10
TUMBES 2017	125	6.0191	10
PIURA 2021	55	4.5161	10
CERRO DE PASCO 2017	82.32	5.1032	10

#### 4.2.4 Rango de periodos para el ajuste espectral y escalamiento de amplitudes

Se ha considerado el criterio de la Norma E.030, en su ítem 30.1.3, que indica: “*ambas componentes se escalan por un mismo factor, de modo que el rango de periodos entre  $0.2 T$  y  $1.5T$  (siendo  $T$  el periodo fundamental), el promedio de los valores espectrales SRSS obtenidos para los distintos juegos de registros no sea menor que la ordenada correspondiente al del espectro de diseño con  $R=1$ .*”

Periodo fundamental : 0.1774 s

Límite inferior  $0.2 T$  : 0.03548 s

Límite superior  $1.5 T$  : 0.26610 s

#### 4.2.5 Espectro objetivo

Para realizar la modificación de registros sísmicos se debe definir el espectro objetivo de acuerdo con la N.T. E 030 (2020). Este está determinado por los siguientes parámetros: factor de zona, factor de uso, factor de amplificación sísmica y factor de suelo. Para el factor de aceleración sísmica se ha considerado el valor de 0.35g como valor conservador que supera los valores de aceleración del espectro de peligro

uniforme que proporciona el SENCICO<sup>9</sup> en la zona de ubicación de la estructura estudiada.

Para el factor de suelo se ha considerado suelo S3 (suelo blando), este parámetro se ha confirmado al realizar un análisis de la transformada de Fourier donde se identifica las frecuencias predominantes y por ende los periodos predominantes de señales sísmicas registradas en Cajamarca, como se muestra en la siguiente tabla donde se han analizado 11 registros sísmicos.

Tabla 11. *Evaluación de periodos de señales sísmicas en Cajamarca para identificar el tipo de suelo predominante.*

REGISTRO	Magnitud	Profundidad	Estación sísmica	Frecuencia	Periodo
1	5.7	34	CIP CAJAMARCA	1.892	0.529
2	5.2	25	CIP CAJAMARCA	1.685	0.593
3	5.8	32	UNC CAJAMARCA	1.852	0.539
4	4.5	22	CIP CAJAMARCA	1.697	0.589
5	4.8	23	CIP CAJAMARCA	1.721	0.581
6	4	46	UNC CAJAMARCA	2.401	0.416
7	4.5	22	UNC CAJAMARCA	1.685	0.593
8	4.7	39	UNC CAJAMARCA	1.697	0.589
9	4.8	23	UNC CAJAMARCA	2.258	0.443
10	4.1	26	UNC CAJAMARCA	1.854	0.539
11	4.1	26	UNC CAJAMARCA	2.117	0.472

Figura 37. *Periodo fundamental del estrato, según el tipo de suelo.*

Suelo Tipo		Ts (s)
S0	Roca dura	< 0,15
S1	Roca o suelos muy rígidos	< 0,30
S2	Suelos intermedios	< 0,40
S3	Suelos blandos	< 0,60

Nota: Norma Técnica E.031 (2019).

<sup>9</sup> Cálculo de espectro de peligro uniforme con la herramienta online de SENCICO: <http://ppsh.sencico.gob.pe/>



Como se observa en la tabla N°11, todos los periodos encontrados están en el intervalo de 0.40 – 0.60 que corresponde a un suelo tipo S3 (suelo blando) según el criterio de la Norma Técnica E 031, por lo que ha empleado este tipo de suelo como parámetro para construir el espectro objetivo.

Tabla 12. Parámetros para la construcción del espectro inelástico.

PARÁMETROS	
Z	0.35
U	1.5
S	1.2
R <sub>ig1</sub>	1
TP	1
TL	1.6

Figura 38. Espectro de respuesta objetivo construido con los parámetros de la Tabla 06.



#### 4.2.6 Escalamiento

Se ha escalado los registros sísmicos para que coincidan con el espectro de aceleraciones de la figura 39 al menos en el rango de periodos indicado en el ítem 4.2.3.

Figura 39. Espectros de pseudoaceleraciones de los registros sísmicos antes de ser escalados.

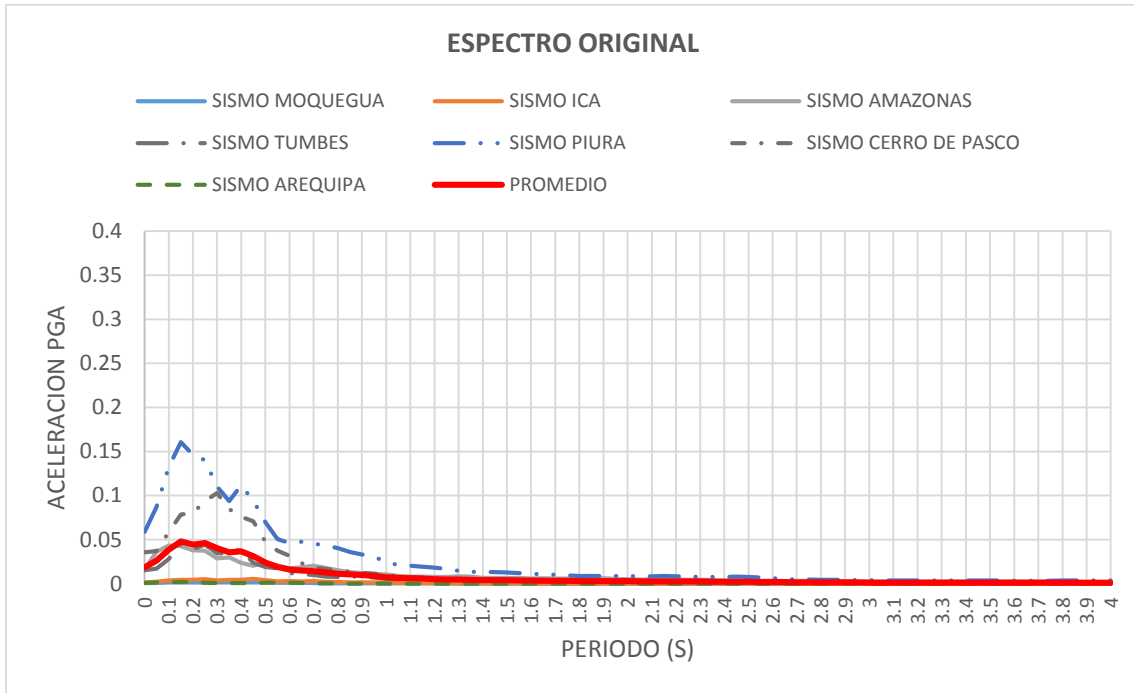
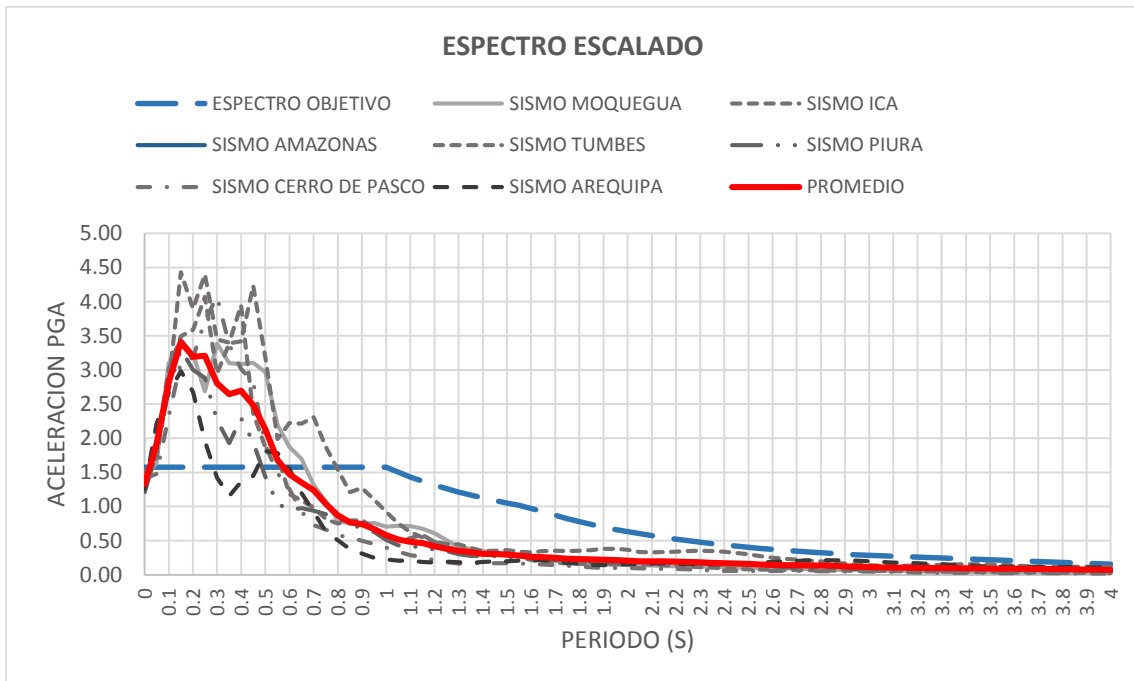


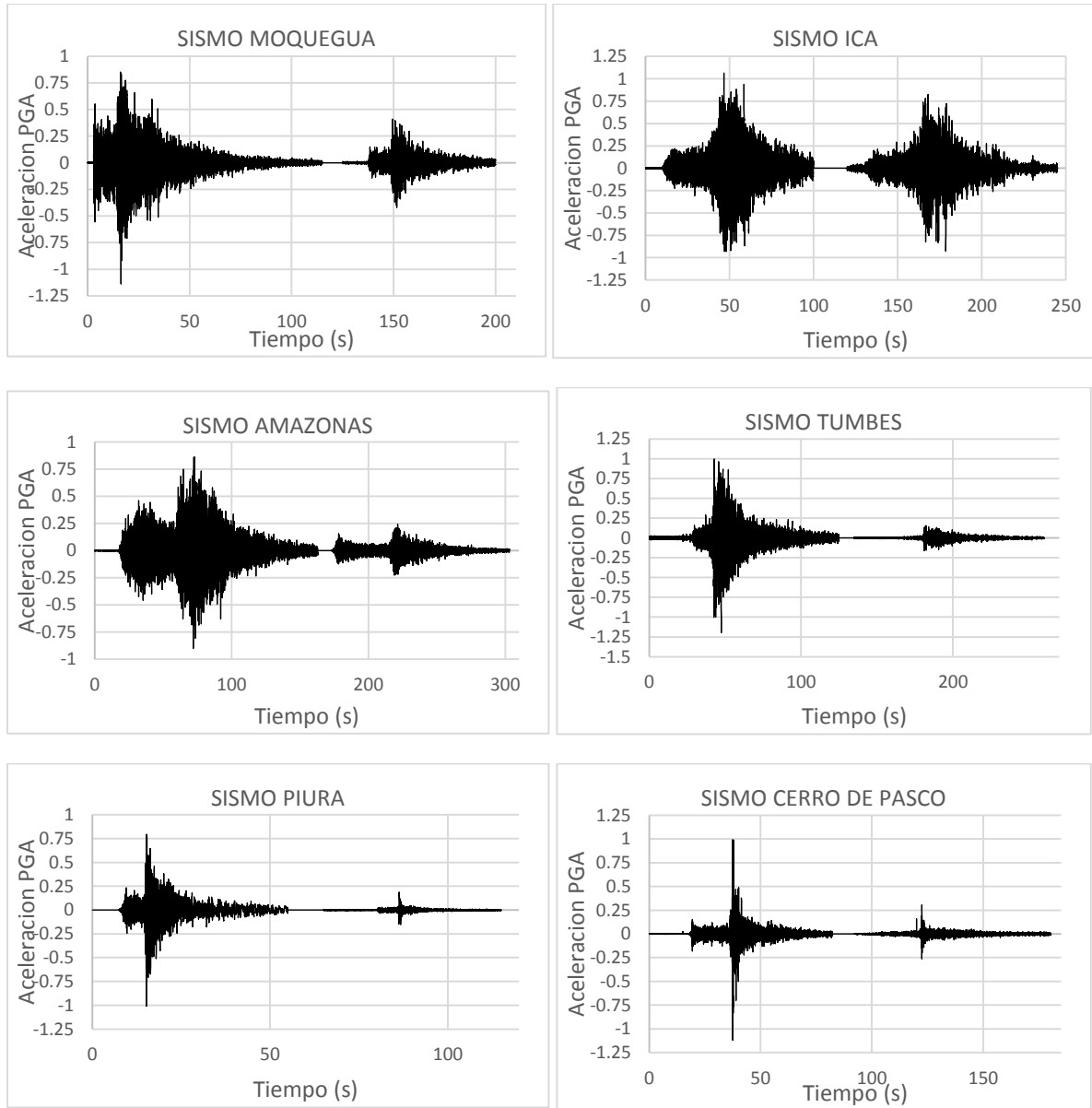
Figura 40. Espectros de pseudoaceleraciones de los registros sísmicos luego de ser escalados

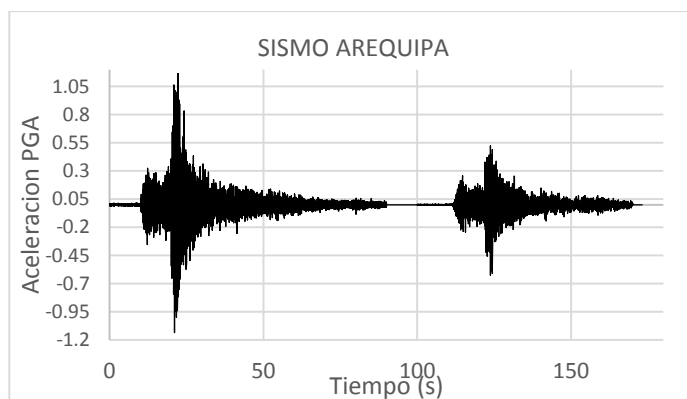


Nota: El espectro promedio escalado debe encontrarse gráficamente en el centro de los espectros escalados individualmente.

Como se observa en la figura el espectro promedio de los sismos seleccionados supera en el rango de las ordenadas de la zona de periodos cortos al espectro objetivo. A continuación, se muestran los registros sísmicos escalados, ensamblados con el intervalo de tiempo y su respectiva réplica.

Figura 41. Sismos escalados con sus respectivas réplicas empleados en el análisis.



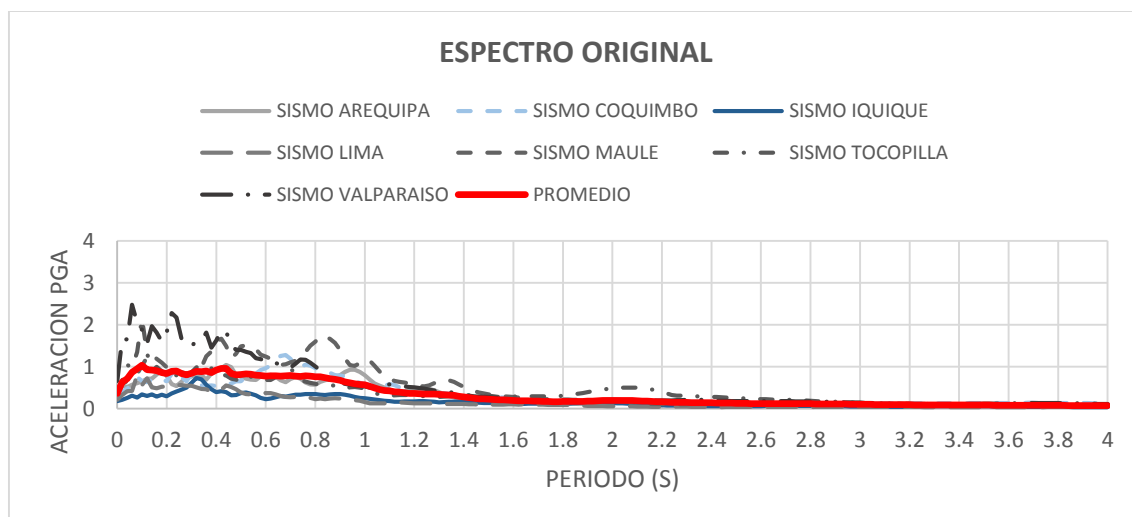


#### 4.2.7 Ajuste espectral de registros sísmicos

El ajuste espectral es un proceso que ha permitido ajustar el registro de aceleraciones leído en una estación sísmica para que representen el peligro sísmico del lugar donde la estructura a evaluar se encuentra, en este caso, con el espectro de respuesta de la Norma E.030 “Diseño Sismorresistente” para los parámetros indicados en la tabla 12.

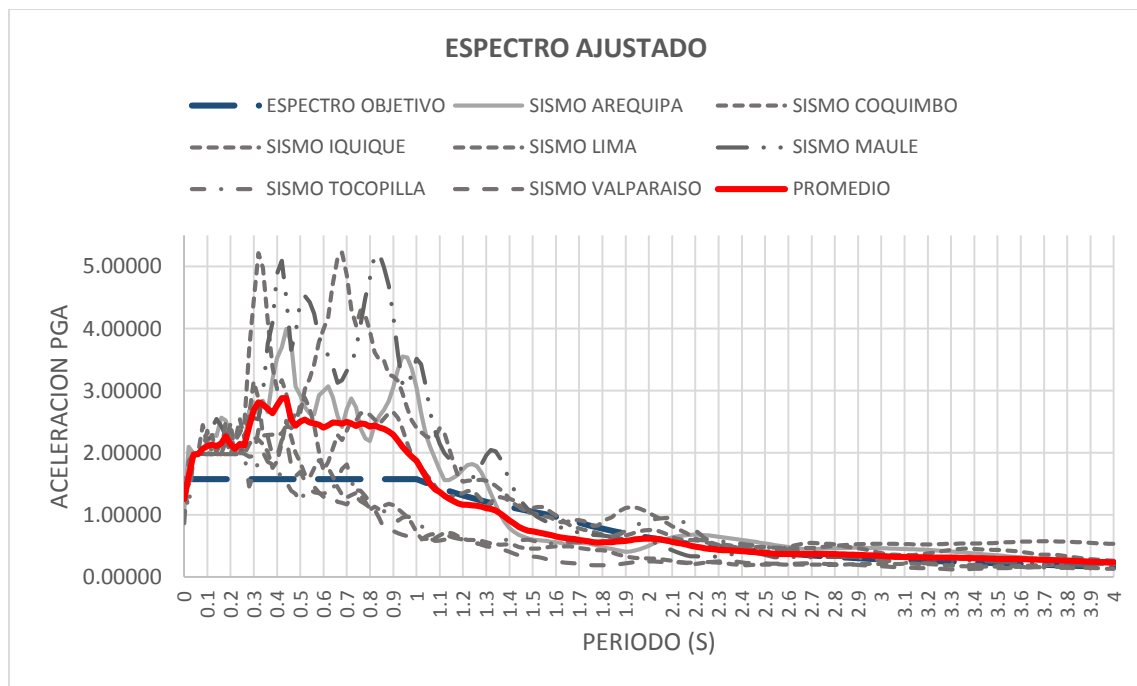
Para este procedimiento se ha empleado el software Seismomatch, la cual es una aplicación capaz de ajustar señales registradas de ciertos sismos para que coincidan con un espectro de respuesta objetivo específico, utilizando el algoritmo wavelets propuesto por Abrahamson (1992) y Hancock et al. (2006) o el algoritmo propuesto por Al Atik y Abrahamson (2010).

Figura 42. Espectros de los registros sísmicos antes de ser ajustados espectralmente.



Como se observa en la imagen, los espectros de los sismos seleccionados se encuentran dispersos. Posteriormente se realiza el procedimiento de ajuste espectral y se aplica un factor de escala para lograr que el espectro promedio esté por encima del espectro objetivo dentro del rango de periodos cortos.

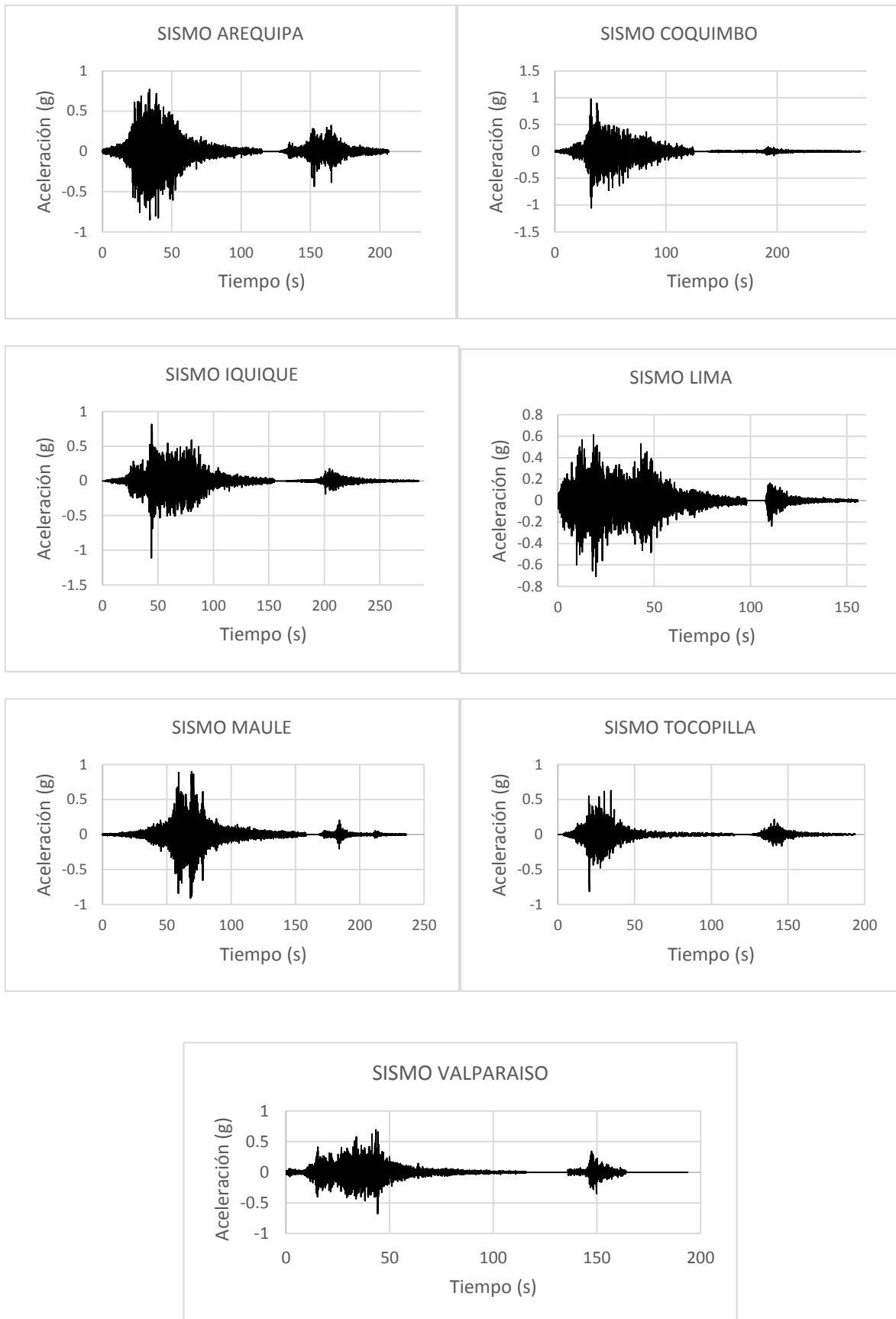
Figura 43. Espectros de los registros sísmicos luego del procedimiento de ajuste espectral.



La figura muestra los espectros de respuesta de los sismos escalados espectralmente para el rango de periodos indicado en el ítem 4.2.4 siendo compatibles con el espectro de respuesta objetivo al menos en el rango de periodos cortos, donde se encuentra el periodo fundamental de la estructura en estudio. Se observa buena convergencia según la metodología indicada en el ítem 2.2.5.

A continuación, se presenta el ensamblaje de los registros sísmicos ajustados espectralmente y sus respectivas réplicas.

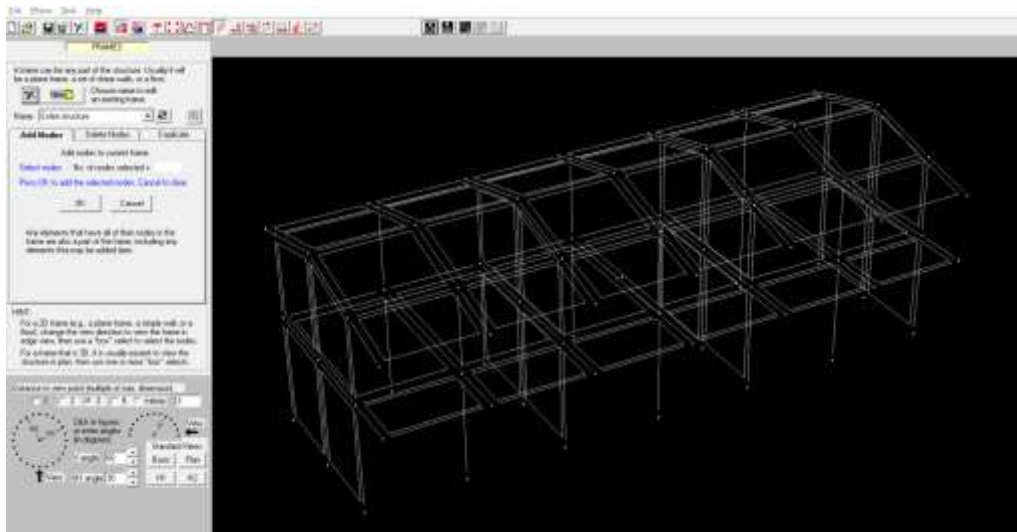
Figura 44. Sismos ajustados espectralmente con sus respectivas réplicas.



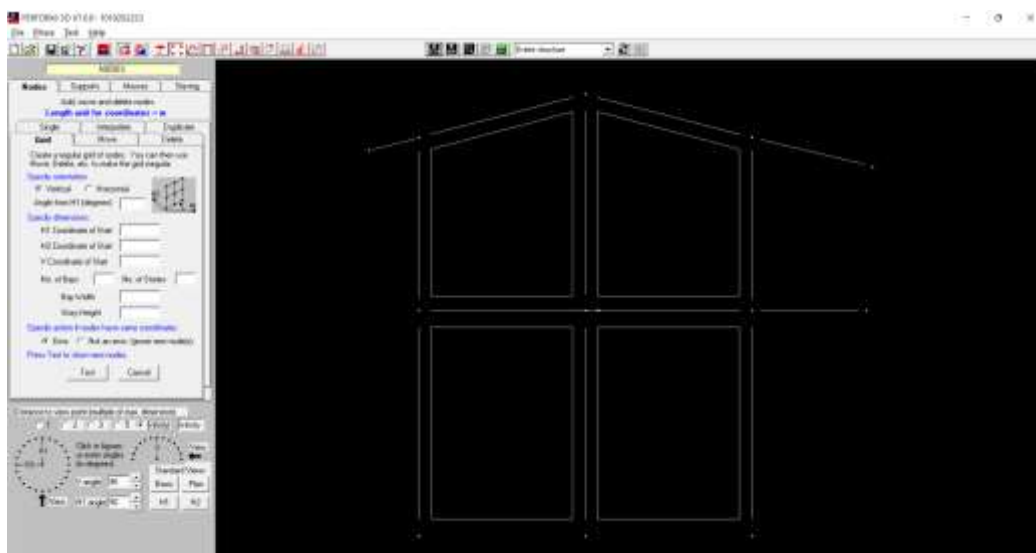
#### 4.2.8 Definición del modelo matemático en PERFORM 3D

El modelo matemático de la estructura se ha definido en el Software Perform 3D, el cual es un programa de diseño por desempeño que contiene herramientas adecuadas para el análisis inelástico, considerando propiedades de los elementos estructurales como vigas, columnas, muros y placas.

Figura 45. Modelo estructural de la edificación en Perform 3D.



(a)

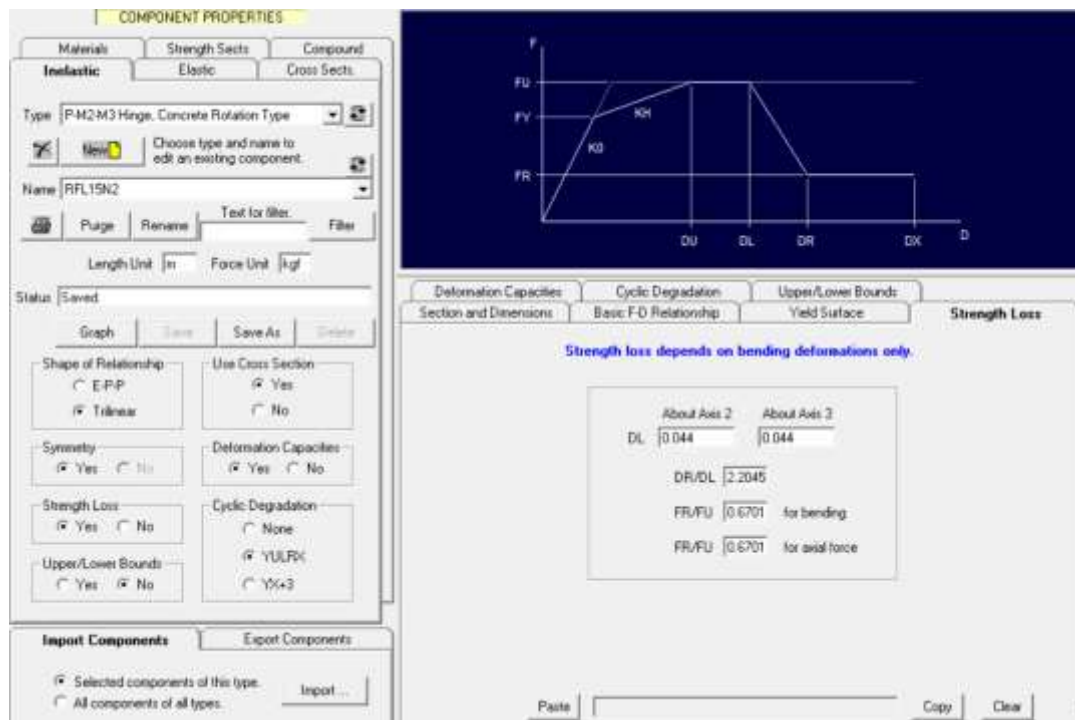


(b)

Nota: (a) Vista isométrica, (b) vista lateral.

En cuanto a la caracterización de la no linealidad de los elementos estructurales, se ha considerado en general un modelo trilineal con degradación de energía para vigas y columnas y con pérdida de resistencia para la albañilería según se puede ver a continuación.

Figura 46. Modelo trilineal para análisis inelástico de una columna de concreto armado construido en Perform 3D.

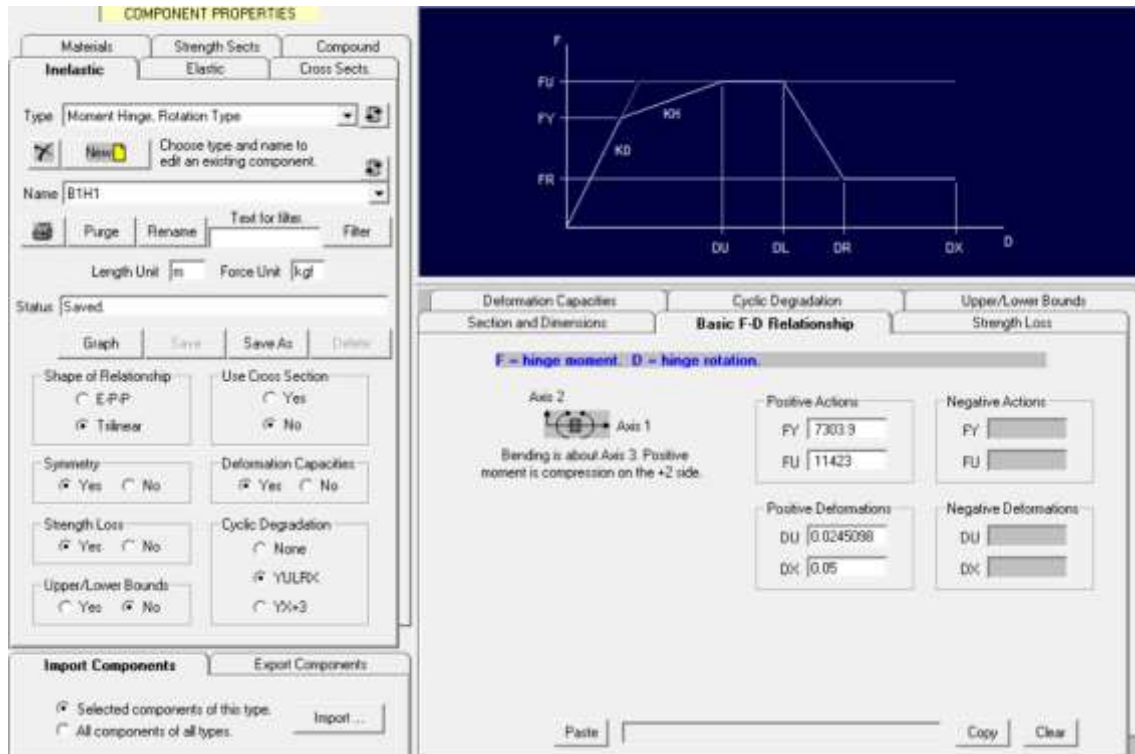


La definición de las propiedades no lineales de las columnas de concreto armado se ha realizado a través de un modelo P-M2-M3 trilineal con pérdida de resistencia y degradación cíclica con los parámetros Y, U, L, R y X que se han tomado como 1, 0.9, 0.7, 0.4 y 0.3, respectivamente según el criterio de Huang, W. y Qian, J. (2012) para elementos de concreto armado. El punto  $F_y$  corresponde al esfuerzo de fluencia, el punto  $F_u$  corresponde al esfuerzo último y el punto  $F_r$  corresponde al esfuerzo residual en el último punto de la pendiente negativa desde ocurre el esfuerzo último. Por otro lado, los puntos:  $D_U$  corresponde al desplazamiento en el esfuerzo último,  $D_R$  es el desplazamiento residual y  $D_X$  es el desplazamiento final al término de la curva de esfuerzo-deformación del elemento. Todos estos datos son extraídos a través del



análisis seccional con la herramienta *Section Designer* del software Etabs, usado como complemento en esta investigación.

Figura 47. Modelo trilineal para análisis inelástico de una viga de concreto armado

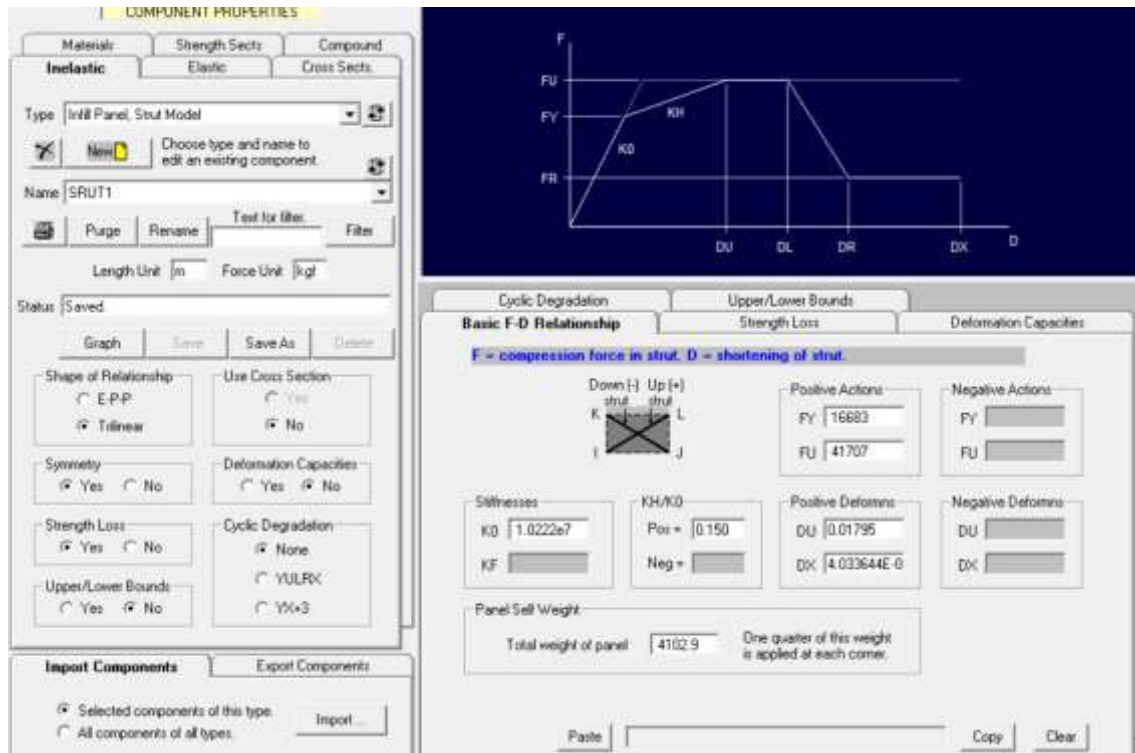


La caracterización de las rótulas plásticas de las vigas de concreto se ha realizado a través de un modelo de Momento rotación trilineal con pérdida de resistencia y degradación cíclica con los parámetros Y, U, L, R y X se han tomado como 1, 0.9, 0.7, 0.4 y 0.3, respectivamente para elementos de concreto armado según el criterio de Huang, W. y Qian, J. (2012). Los puntos de construcción de la rótula plástica se han tomado siguiendo el mismo criterio de las columnas.

Igualmente, la caracterización de la no linealidad en muros de albañilería se ha considerado un modelo trilineal de fuerza deformación con pérdida de resistencia según lo visto en el ítem 2.2.6.4 de la presente investigación. Se ha considerado un modelo de diagonal equivalente de acuerdo con la propuesta de Calaveri L. et al (2013), el cual

está implementado como sección inelástica para muros de albañilería en el software Perform 3D.

Figura 48. Modelo no lineal de muro de albañilería definido como diagonal equivalente.



#### 4.2.9 Cálculo de derivas de entrepiso

Con el modelo estructural y la demanda sísmica definida, se realizó el análisis dinámico tiempo-historia a la estructura considerando por separado los casos de sismos sin réplicas y sismos con réplicas para las metodologías de ajuste espectral y escalamiento. Las derivas se han calculado en base a los desplazamientos máximos encontrados en cada nivel de la estructura luego de la ejecución del análisis no lineal tiempo historia para cada registro sísmico.

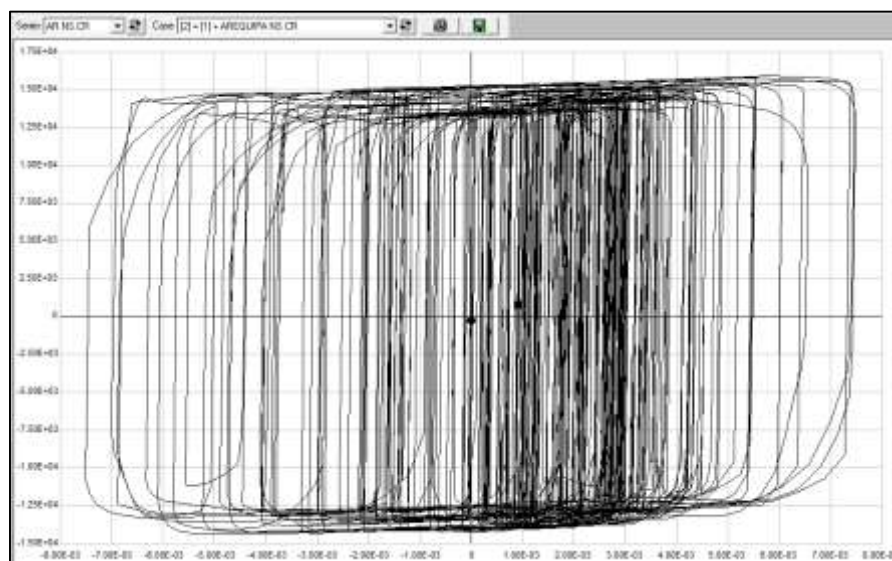
Figura 49. Muestra de máximo desplazamiento alcanzado durante la ejecución de análisis no lineal tiempo – historia para la estructura en estudio.



#### 4.2.10 Estimación del índice de daño

Para la estimación del índice de daño se ha considerado primero mediante análisis seccional usando section designer en el software ETABS V.19, la obtención de la máxima rotación del elemento y máximo momento de fluencia.

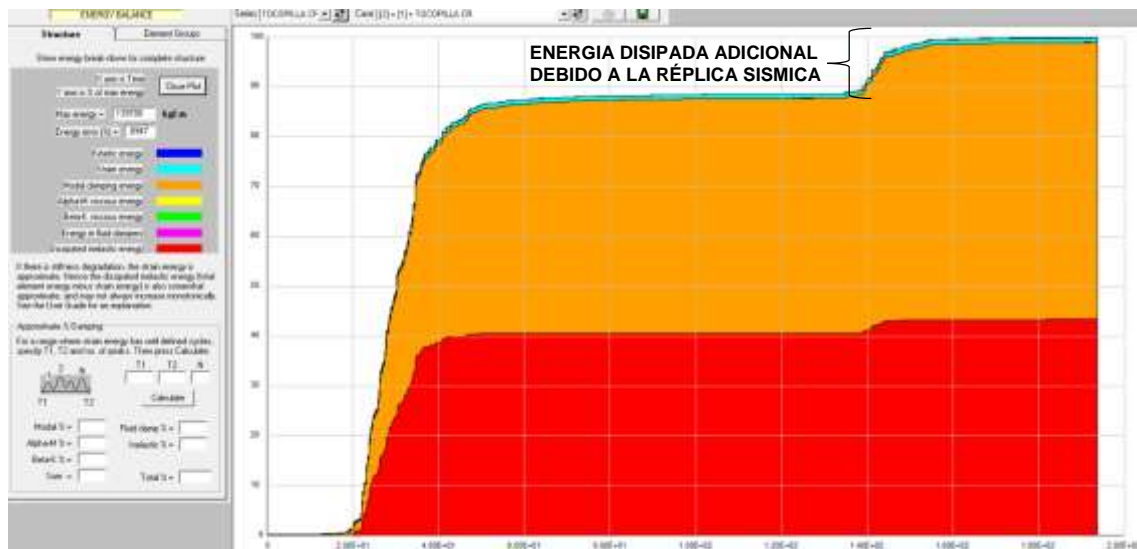
Figura 50. Comportamiento histerético de una columna sometida a un sismo con réplica.



Posteriormente, usando el software Perform 3D se calcula la energía de rotación que alcanza el elemento en presencia del sismo luego de ejecutado el análisis no lineal tiempo – historia para los casos de sismos únicos y sismos con réplicas.

De esta manera, el índice de daño se calcula dividiendo la rotación alcanzada en presencia del sismo entre la rotación máxima posible sumándole a ello el cociente de la energía histerética disipada por el parámetro de degradación del material entre el esfuerzo de fluencia, según lo visto en el ítem 2.3.4 de la presente investigación.

Figura 51. Energía histerética disipada para un sismo con réplica



*Nota: La energía disipada de un sismo con réplica se muestra como un pequeño salto en la energía acumulada de la estructura. Se observa que, incluyendo el efecto de réplicas, existe mayor disipación de energía en la estructura.*

### 4.3 Métodos de investigación

La investigación alcanza el nivel predictivo, a partir de los datos obtenidos se busca evaluar el efecto de sismos caracterizados con réplicas sobre las derivas y el índice de daño en la infraestructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil, en la localidad de Paríamarca. La variable para manipular es la acción sísmica.

#### **4.4 Población, muestra, unidad de análisis y unidades de observación**

La población de estudio la constituye todas las instituciones educativas del nivel primario en el área rural del distrito de Cajamarca que han sido construidas en el periodo 2014 – 2016 con sistema estructural de pórticos de concreto armado en una dirección y albañilería en otra dirección.

La muestra está constituida por la institución educativa: I.E. N°8030 Fernández Gil en la localidad de Pariamarca.

La unidad de análisis y observación constituye la superestructura de la escuela antes mencionada.

#### **4.5 Técnicas e instrumentos de recopilación de información**

Se ha considerado lo siguiente: revisión de material bibliográfico, análisis documental y descripción de los resultados obtenidos.

Se ha usado el método cualitativo y cuantitativo en función a la escala de cada variable para medirlas. Asimismo, las técnicas se han realizado en base a Normas Técnicas Peruanas, normativas especializadas de otros países y software de cálculo estructural.

#### **4.6 Técnicas para el procesamiento y análisis de la información**

El procesamiento de datos se ha realizado en software de cálculo estructural Perform 3D y el análisis de la información se ha realizado mediante tablas doble entrada, gráficos y cuadros comparativos en el programa Microsoft Excel.

#### **4.7 Matriz de consistencia metodológica**

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES/ CATEGORÍAS	DIMENSIONES/ FACTORES	INDICADORES/ CUALIDADES	FUENTE O INSTRUMENTO DE RECOLECCIÓN DE DATOS	METODOLOGÍA	POBLACIÓN Y MUESTRA
¿Cuál es el efecto de réplicas sísmicas sobre las derivas e índice de daño en la I.E. N°82030 Fernández Gil en la localidad de Paríamarca, Cajamarca?	Determinar el efecto de réplicas sísmicas sobre las derivas e índice de daño en La I.E. N°82030 Fernández Gil, en la localidad de Paríamarca, Cajamarca.	Los desplazamientos y derivas de entrepiso máximas producidas en la infraestructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil por sismos con réplicas son superiores a los equivalentes producidos por sismos únicos.	DERIVAS DE ENTREPISO	>0	DESPLAZAMIENTOS	CALCULO ESTRUCTURAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Se recopila la bibliografía especializada (expediente técnico, tesis, libros, artículos científicos) para construir el marco teórico.</li> <li>b) Caracterizar el escenario sísmico, de acuerdo a la N.T. E 030 (2019). Caracterizar la resistencia del concreto y fluencia del acero.</li> <li>c) Definir el espectro objetivo. Se construirá el espectro para el peligro sísmico local, dicho espectro se usará en coordenadas espectrales aceleración y tiempo.</li> <li>d) Búsqueda de registros sísmicos de diferentes duraciones.</li> <li>e) Escalado espectral de los registros sísmicos para que coincidan con el peligro sísmico de la zona.</li> <li>f) Se usa el software Perform 3D para modelar las estructuras.</li> <li>g) Escalar registros principales usando el software Seissoft con la metodología de fragmentos de onda en el dominio del tiempo.</li> <li>h) Se calibra el modelo. Para ello se aplicará un análisis elástico en un software de cálculo similar (SAP, Etabs) y luego un análisis dinámico.</li> <li>i) Aplicar el análisis dinámico no lineal a la estructura seleccionada.</li> <li>j) Obtener los datos para estimar las derivas de entrepiso, índice de daño</li> <li>k) Las derivas se calculan en base a los desplazamientos.</li> <li>l) Estimación del índice de daño.</li> </ul>	La población de estudio la constituye todas las instituciones educativas del nivel primario en el área rural del distrito de Cajamarca que han sido construidas en el periodo 2014 – 2016 con sistema estructural de pórticos de concreto armado en una dirección y albañilería en otra dirección. La muestra es la I.E. N°8030 Fernández Gil en la localidad de Paríamarca.
		El índice de daño calculado en la infraestructura de la I.E. N°82030 Fernández Gil debido a la acción sismos con réplicas es superior al equivalente producido por sismos únicos.	REPLICAS SÍSMICAS	>0	TIEMPO	REGISTROS SÍSMICOS		
		INDICE DE DAÑO	0-1	ROTACIONES MÁXIMAS Y ENERGÍA DISIPADA	CALCULO ESTRUCTURAL			

## CAPITULO V

### 5 RESULTADOS Y DISCUSION

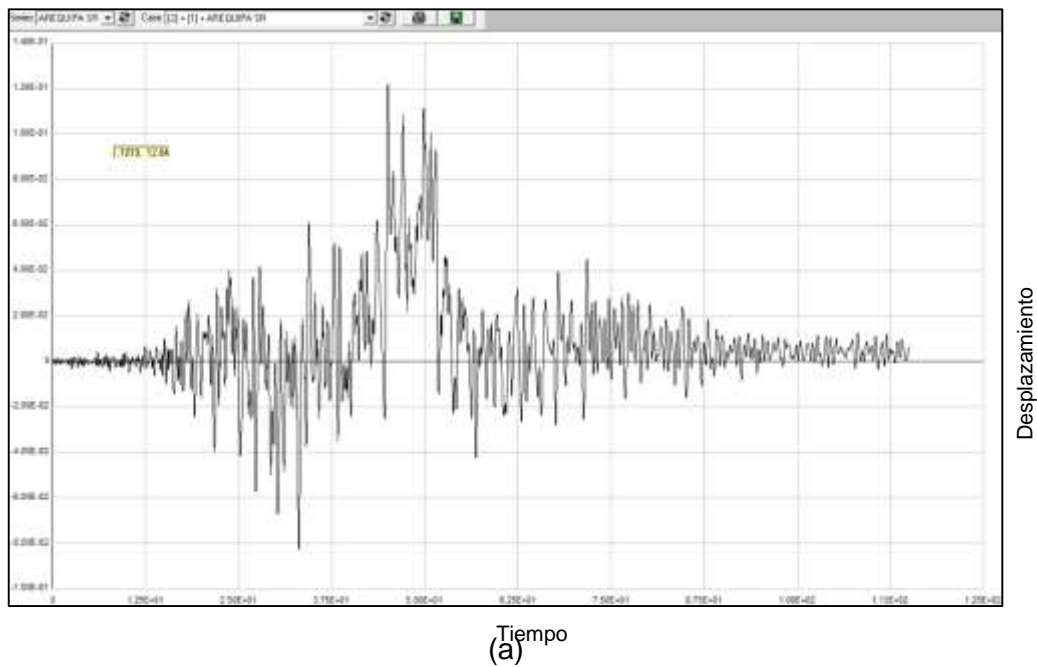
#### 5.1 Presentación de resultados

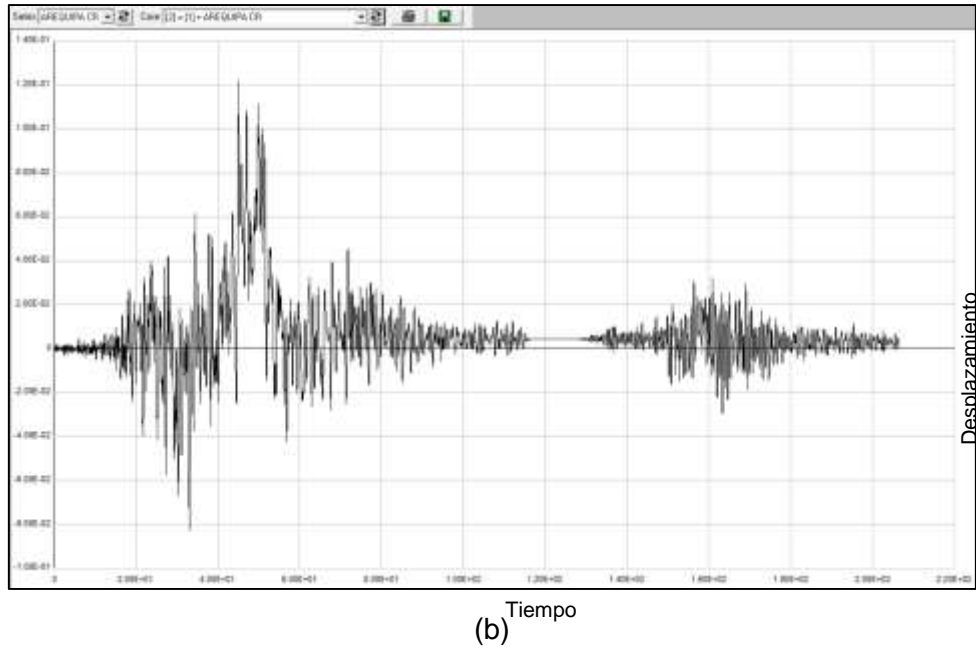
A continuación, se presentan los resultados obtenidos en función a los objetivos específicos de la presente investigación: determinación de derivas e índice de daño y comparación de los resultados obtenidos entre el método de escalamiento y ajuste espectral de registros sísmicos.

##### 5.1.1 Estimación de derivas y desplazamientos

El cálculo de derivas se ha realizado en función de los desplazamientos encontrados, que han sido normalizados respecto de la altura de cada del nivel de entrepiso. Para todos los registros sísmicos de cada serie de desplazamientos calculados en Perform 3D mediante análisis no lineal tiempo historia para los casos de sismo único y sismo con réplica.

Figura 52. Series de desplazamientos obtenidos para sismo único y sismo con réplica, registro sísmico Arequipa - 2001.





Nota: Gráficos de desplazamientos alcanzados de donde se obtiene el máximo desplazamiento en cada sismo: (a) sin réplica (b) con réplica.

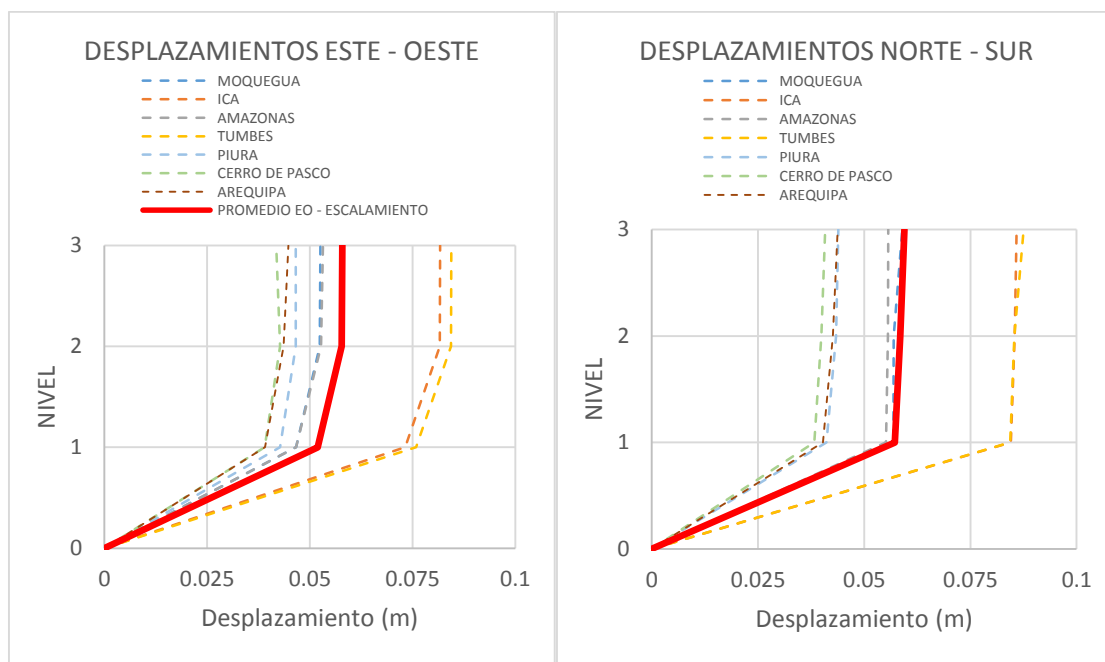
Tabla 13. Derivas calculadas para los registros sísmicos con y sin réplicas con el método de escalamiento.

SISMO	NIVEL	EO			NS		
		SIN REPLICAS	CON RÉPLICAS	%	SIN REPLICAS	CON RÉPLICAS	%
MOQUEGUA	1	0.0114	0.0114	0.00	0.0139	0.0139	0.00
	2	0.0018	0.0018	0.00	0.0000	0.0000	0.00
	3	0.0002	0.0002	0.00	0.0026	0.0026	0.00
ICA	1	0.0179	0.0179	0.00	0.0207	0.0207	0.00
	2	0.0027	0.0027	0.00	0.0003	0.0003	0.00
	3	0.0000	0.0000	0.00	0.0006	0.0006	0.00
AMAZONAS	1	0.0114	0.0114	0.00	0.0551	0.0551	0.00
	2	0.0019	0.0019	0.00	0.0005	0.0005	0.00
	3	0.0006	0.0006	0.00	0.0000	0.0000	0.00
TUMBES	1	0.0186	0.0186	0.00	0.0207	0.0207	0.00
	2	0.0027	0.0027	0.00	0.0003	0.0003	0.00
	3	0.0001	0.0001	0.00	0.0027	0.0027	0.00
PIURA	1	0.0105	0.0105	0.00	0.0411	0.0411	0.00
	2	0.0012	0.0012	0.00	0.0022	0.0022	0.00
	3	0.0000	0.0000	0.00	0.0006	0.0006	0.00
CERRO DE PASCO	1	0.0096	0.0096	0.00	0.0383	0.0383	0.00
	2	0.0012	0.0012	0.00	0.0017	0.0017	0.00
	3	0.0012	0.0012	0.00	0.0009	0.0009	0.00
AREQUIPA	1	0.0096	0.0096	0.00	0.0099	0.0099	0.00
	2	0.0014	0.0014	0.00	0.0007	0.0007	0.00
	3	0.0015	0.0015	0.00	0.0015	0.0015	0.00



Como se observa en la tabla N°13, las derivas máximas calculadas para sismos principales y sismos con su respectiva réplica sísmica son iguales, es decir, existe una variación del 0%. Se puede observar que, durante la ocurrencia del sismo principal, la estructura alcanza su máximo desplazamiento para esa señal sísmica, luego cuando sucede la réplica la estructura también se desplaza, pero en menor medida por lo que su desplazamiento no supera al desplazamiento ocurrido anteriormente.

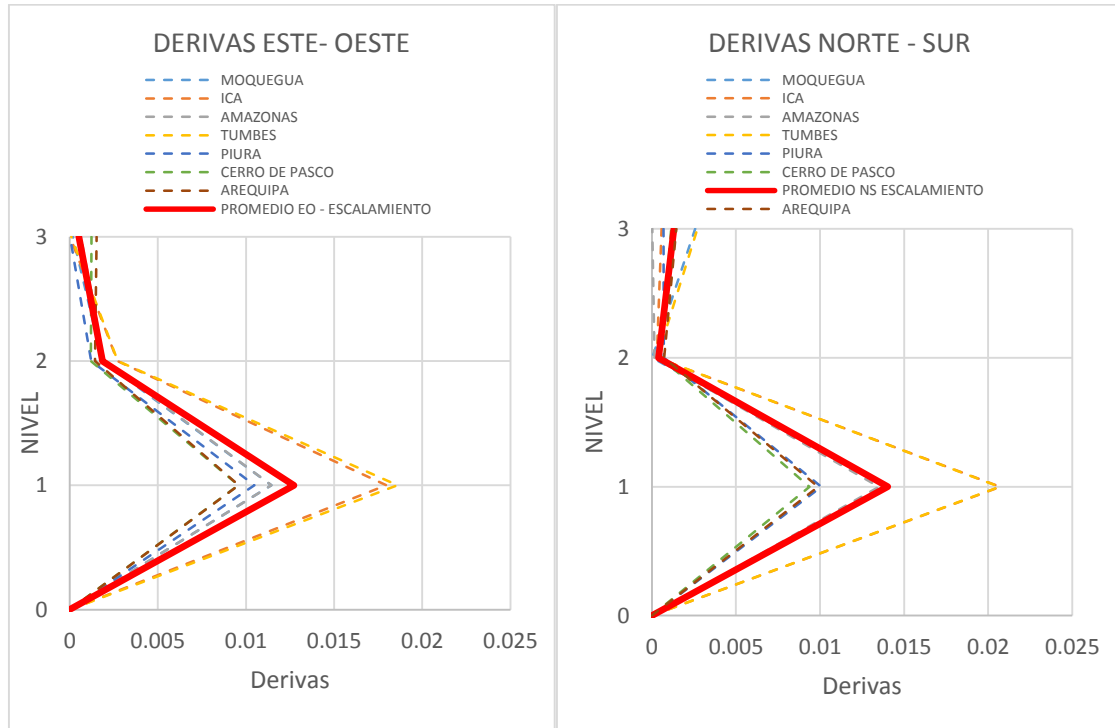
Figura 53. Desplazamientos máximos de entrepiso calculados para los registros sísmicos usando el método de escalamiento.



Nota: Nivel 3 es la cumbrera de la edificación.

De acuerdo con lo calculado, se observa que en ambas direcciones el rango de desplazamientos para el primer nivel está entre 0.04m y 0.085m. Asimismo, se observa que la respuesta promedio para el primer nivel en ambas direcciones está cerca de 0.06m. Luego, en los siguientes niveles se observa un menor desplazamiento adicional sobre todo en el nivel 3 que es la cumbrera de la edificación.

Figura 54. Derivas máximas de entrepiso calculadas para los registros sísmicos usando el método de escalamiento.



En la figura n°54 se observan las respuestas promedio de las derivas de entrepiso en ambas direcciones para la estructura luego del análisis no lineal con los registros sísmicos escalados. Se observa que en la dirección norte-sur las derivas son ligeramente mayores sobre todo en el primer nivel. No obstante, la respuesta promedio en ambas direcciones para el primer nivel (máxima deriva) se puede notar que está en el rango de 0.01 y 0.015.

Para el registro sísmico escalado de Tumbes, se ha encontrado mayores derivas de entrepiso, mientras que para el sismo escalado de Cerro de Pasco y Arequipa se ha encontrado la menor respuesta.

A continuación, se presentan las derivas calculadas con los registros sísmicos ajustados espectralmente.

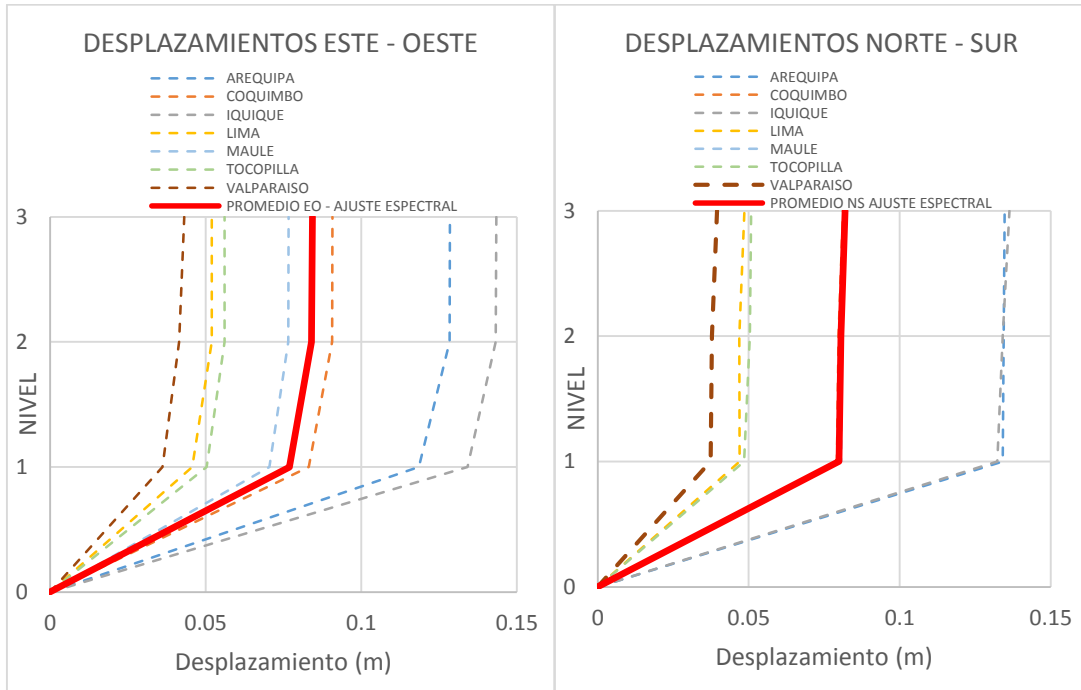
Tabla 14. Derivas calculadas para los registros sísmicos con y sin réplicas con el método de ajuste espectral

SISMO	NIVEL	ESTE - OESTE			NORTE - SUR		
		SIN REPLICA	CON RÉPLICAS	%	SIN REPLICA	CON RÉPLICAS	%
AREQUIPA	1	0.0290	0.0290	0.00	0.0329	0.0329	0.00
	2	0.0032	0.0032	0.00	0.0001	0.0001	0.00
	3	0.0001	0.0001	0.00	0.0005	0.0005	0.00
COQUIMBO	1	0.0204	0.0204	0.00	0.0194	0.0194	0.00
	2	0.0024	0.0024	0.00	0.0002	0.0002	0.00
	3	0.0001	0.0001	0.00	0.0018	0.0018	0.00
IQUIQUE	1	0.0329	0.0329	0.00	0.0324	0.0324	0.00
	2	0.0029	0.0029	0.00	0.0006	0.0006	0.00
	3	0.0003	0.0003	0.00	0.0029	0.0029	0.00
LIMA	1	0.0112	0.0112	0.00	0.0115	0.0115	0.00
	2	0.0020	0.0020	0.00	0.0000	0.0000	0.00
	3	0.0000	0.0000	0.00	0.0021	0.0021	0.00
MAULE	1	0.0173	0.0173	0.00	0.0198	0.0198	0.00
	2	0.0020	0.0020	0.00	0.0001	0.0001	0.00
	3	0.0001	0.0001	0.00	0.0014	0.0014	0.00
TOCOPILLA	1	0.0123	0.0123	0.00	0.0119	0.0119	0.00
	2	0.0018	0.0018	0.00	0.0006	0.0006	0.00
	3	0.0001	0.0001	0.00	0.0006	0.0006	0.00
VALPARAISO	1	0.0089	0.0089	0.00	0.0092	0.0092	0.00
	2	0.0017	0.0017	0.00	0.0002	0.0002	0.00
	3	0.0020	0.0020	0.00	0.0021	0.0021	0.00

En la tabla N°14 se aprecia los resultados obtenidos usando el método de ajuste espectral, se puede ver que al igual que lo visto en la tabla N°13 la diferencia entre las derivas calculadas para los sismos principales y los sismos con sus réplicas es nula. Se tiene que el desplazamiento máximo ocurre siempre en presencia del sismo principal y luego, cuando sucede la réplica sísmica la estructura sigue desplazándose, pero en menor magnitud.

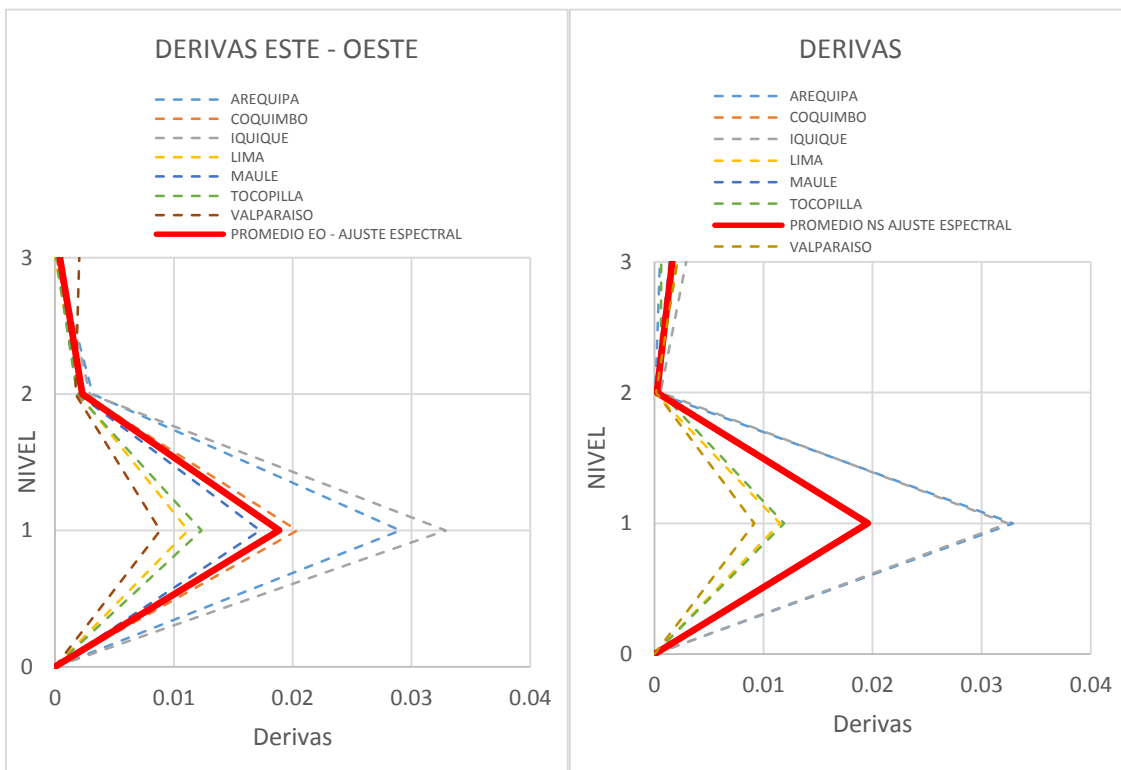
La figura N°55 presenta los desplazamientos calculados en ambas direcciones para los registros sísmicos ajustados espectralmente. Se puede notar que para la dirección norte-sur existe mayor desplazamiento en todos los niveles respecto de la dirección este – oeste. Asimismo, se observa que la respuesta promedio en ambas direcciones para el primer nivel está cerca de 0.1m.

Figura 55. Desplazamientos máximos de entrepiso calculados para los registros sísmicos usando el método de ajuste espectral.



Nota: Nivel 3 es la cumbre de la edificación.

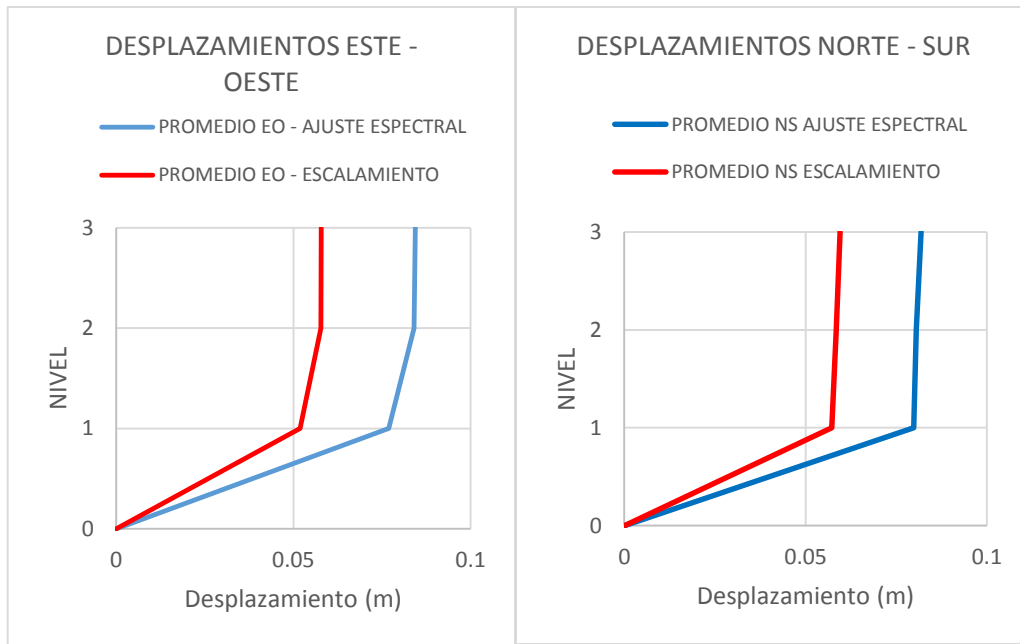
Figura 56. Derivas máximas de entrepiso calculadas para los registros sísmicos usando el método de ajuste espectral.



La figura N°56 presenta las respuestas promedio de las derivas de entrepiso en ambas direcciones para la estructura luego del análisis no lineal con los registros sísmicos ajustados espectralmente. Se observa la respuesta promedio de la deriva máxima (primer nivel) está muy cerca de 0.02.

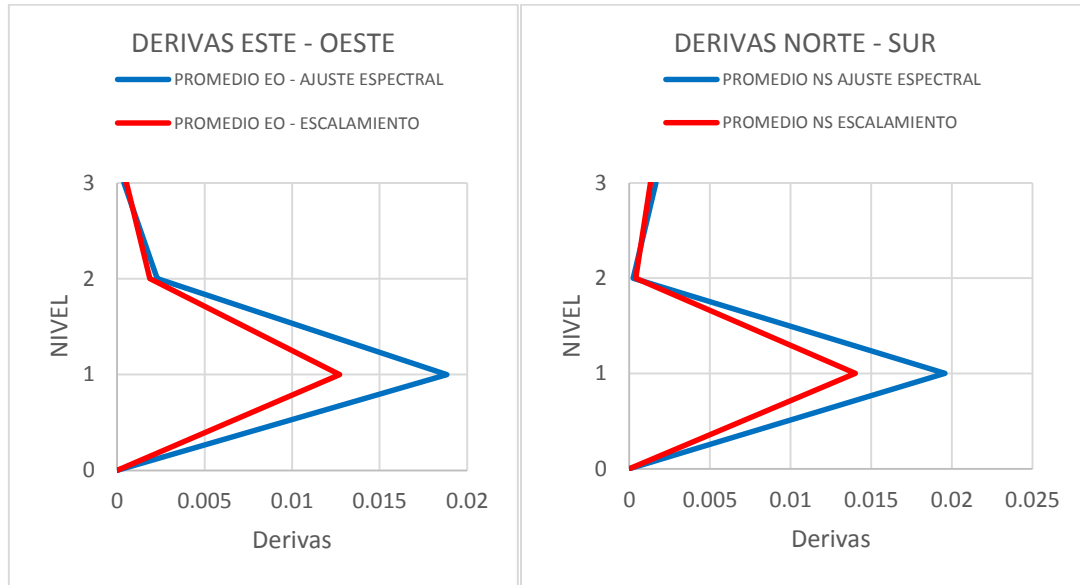
A continuación, se presenta la comparación entre los desplazamientos y derivas de entrepiso calculados con las metodologías de escalamiento y ajuste espectral de señales sísmicas.

Figura 57. Comparación entre respuesta promedio de desplazamientos entre los resultados de los registros sísmicos escalados y los registros ajustados espectralmente.



Como se observa en la figura N°57 en ambas direcciones la respuesta promedio de los desplazamientos en cada nivel calculados para la edificación de la I.E. N°82030 Fernández Gil es mayor para las señales sísmicas ajustadas espectralmente (azul) que para las señales sísmicas escaladas (rojo).

Figura 58. Comparación entre respuesta promedio de derivas entre los resultados de los registros sísmicos escalados y los registros ajustados espectralmente.



La figura N°58 muestra que en ambas direcciones la respuesta promedio de las derivas de entrepiso en cada nivel es mayor para las señales sísmicas ajustadas espectralmente (azul) que para las señales sísmicas escaladas (rojo). En la dirección este – oeste se ha calculado una diferencia en el primer nivel de 0.0061 que representa un 33%. En la dirección norte – sur se ha calculado una diferencia en el primer nivel de 0.0055 que representa un 28%.

### 5.1.2 Estimación del Índice de daño en la edificación

El índice de daño se ha calculado según la ecuación 21 y de acuerdo con lo indicado en el ítem 4.2.10 en función de las rotaciones máximas de los elementos estructurales y la energía histerética disipada en la estructura.

En la figura N°59 se presentan los valores de índice de daño calculados para los registros sísmicos escalados. Se puede notar que, en la mayoría de los sismos aplicados, la incorporación de replicas sísmicas aumenta en cierto porcentaje el índice de daño calculado en comparación con el índice estimado con la aplicación solo del sismo principal.

Figura 59. Índice de daño calculado para los registros sísmicos escalados.

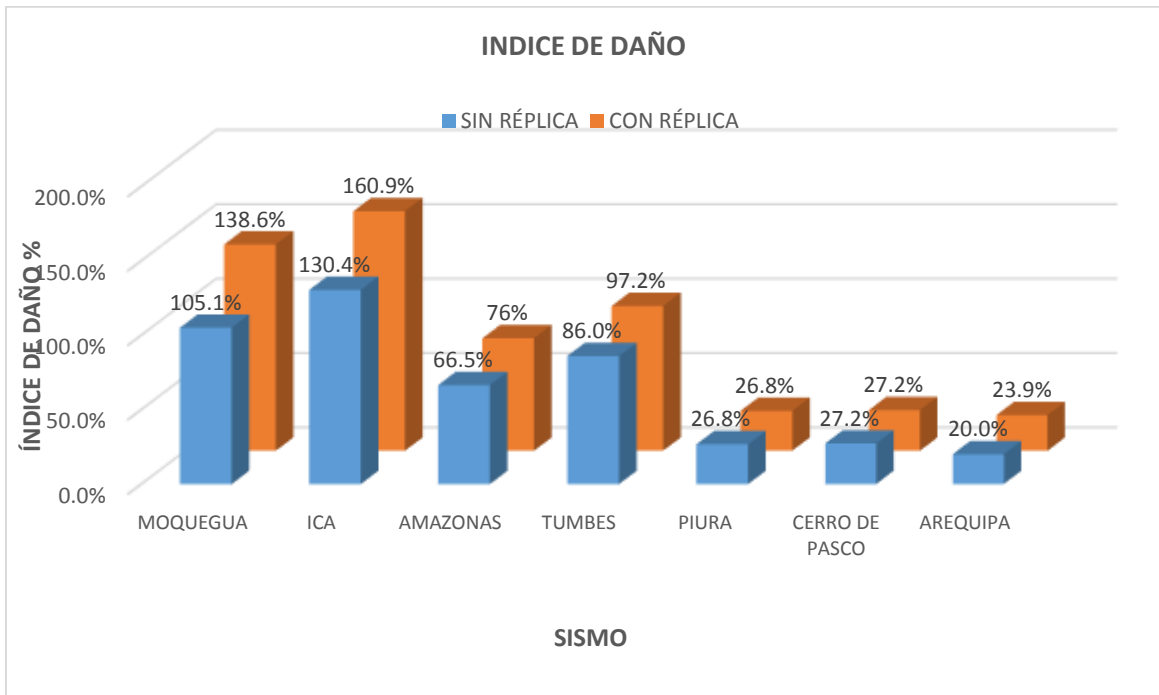
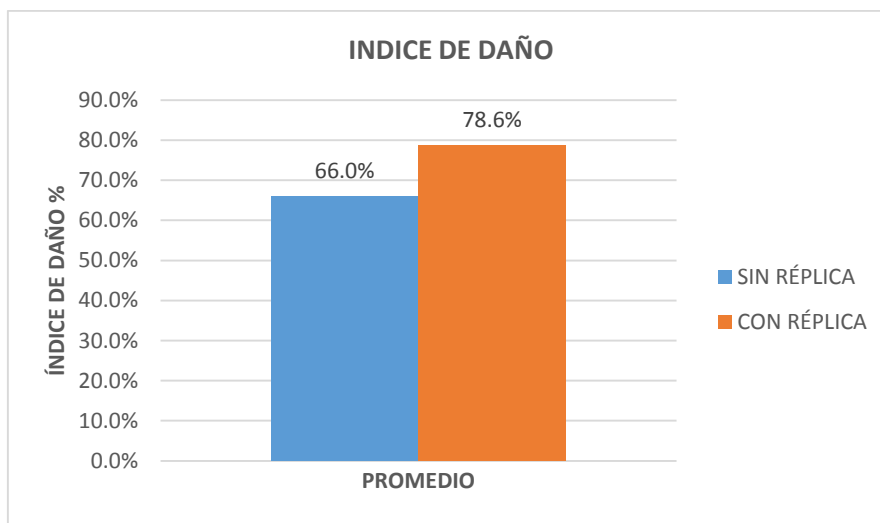
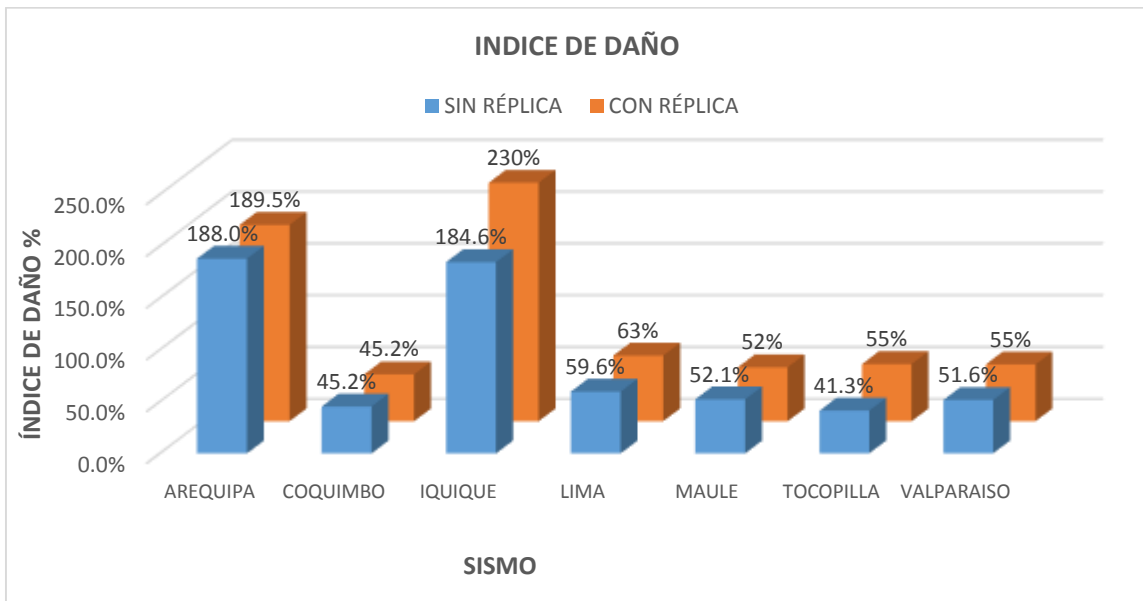


Figura 60. Índice de daño promedio calculado para los sismos escalados



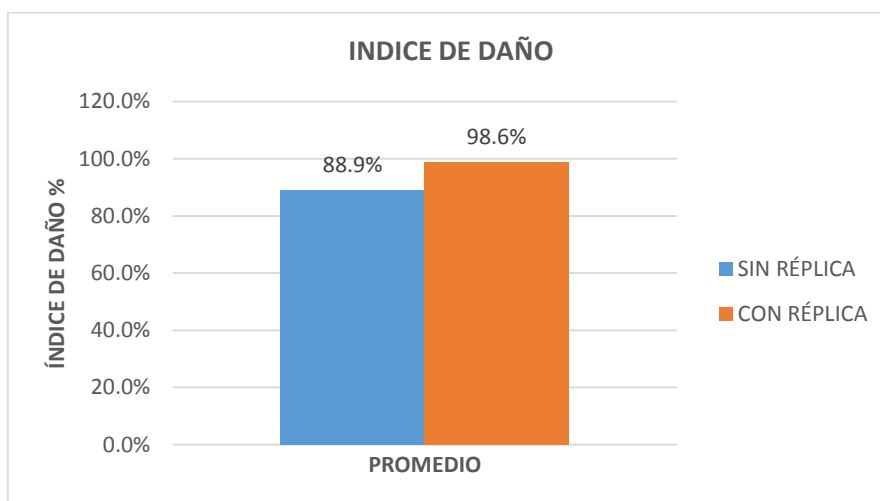
Como se aprecia en la figura N°60, el índice de daño de la respuesta promedio de los registros sísmicos escalados es de 66.0% para los sismos principales y de 78.6% para los sismos que han considerado réplicas en su composición, siendo la diferencia de 12.60%.

Figura 61. Índice de daño calculado para los registros sísmicos ajustados espectralmente.



Para el caso de los registros sísmicos ajustados espectralmente, se observa en la figura N°61 que en la mayoría de los casos, se tiene un índice de daño calculado mayor para los registros con réplicas sísmicas respecto de los sismos únicos, principalmente en el sismo de Iquique.

Figura 62. Índice de daño promedio calculado para los registros sísmicos ajustados espectralmente

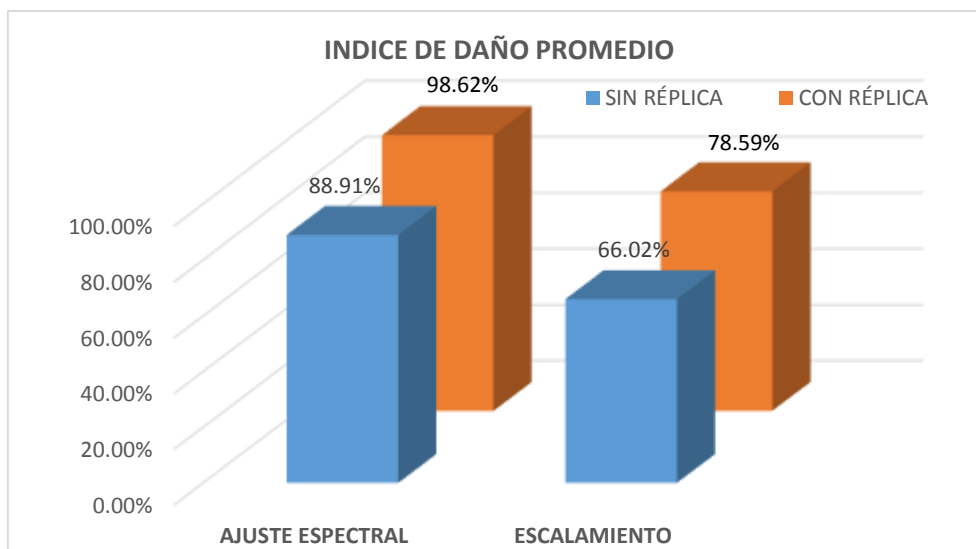


Como se puede notar en el gráfico de la figura N°62, el índice de daño promedio de los registros sísmicos ajustados espectralmente es de 88.9%, el cual es menor al valor



calculado para los registros sísmicos con réplicas que es de 98.60%, existiendo una diferencia de 9.70%.

Figura 63. Comparación entre el índice de daño promedio calculado para los registros sísmicos escalados y los registros ajustados espectralmente.



Al realizar la comparación del índice de daño promedio calculado usando ambas metodologías de modificación de señales sísmicas, se observa en la figura N°63 que al usar el ajuste espectral se ha calculado un índice de daño superior al índice calculado usando el escalamiento. La diferencia en el caso de sismos únicos es de 22.89% y de 20.06% para los sismos con réplicas.

## 5.2 Análisis, interpretación y discusión de resultados

### 5.2.1 Derivas y desplazamientos

Como se puede notar en la tabla 13 y 14, para todos los registros sísmicos usados, no se observa diferencia en los resultados de desplazamientos y derivas calculados para los sismos principales y los sismos con réplicas. En todos los casos, para la dirección este-oeste y norte-sur, se tiene que el desplazamiento máximo de la estructura ocurre durante el sismo principal, aunque en presencia de la réplica también existen desplazamientos, pero no superan al desplazamiento máximo alcanzado inicialmente.

En cuanto al valor calculado de derivas, se ha realizado la comparación con el criterio de la Norma E.030 “Diseño Sismorresistente”, pues los registros sísmicos usados han sido escalados al espectro de diseño inelástico de este código de construcción. Así, se tienen las siguientes tablas resumen de derivas calculadas para los registros sísmicos con y sin réplicas.

*Tabla 15. Resumen de derivas calculadas para los registros sísmicos escalados*

SISMO	NIVEL	ESTE - OESTE		CUMPLE	NORTE - SUR		CUMPLE
		SIN REPLICA	CON RÉPLICAS		SIN REPLICA	CON RÉPLICAS	
MOQUEGUA	1	0.0114	0.0114	NO	0.0139	0.0139	NO
	2	0.0018	0.0018	SI	0.0000	0.0000	SI
	3	0.0002	0.0002	SI	0.0026	0.0026	SI
ICA	1	0.0179	0.0179	NO	0.0207	0.0207	NO
	2	0.0027	0.0027	SI	0.0003	0.0003	SI
	3	0.0000	0.0000	SI	0.0006	0.0006	SI
AMAZONAS	1	0.0114	0.0114	NO	0.0551	0.0551	NO
	2	0.0019	0.0019	SI	0.0005	0.0005	SI
	3	0.0006	0.0006	SI	0.0000	0.0000	SI
TUMBES	1	0.0186	0.0186	NO	0.0207	0.0207	NO
	2	0.0027	0.0027	SI	0.0003	0.0003	SI
	3	0.0001	0.0001	SI	0.0027	0.0027	SI
PIURA	1	0.0105	0.0105	NO	0.0411	0.0411	NO
	2	0.0012	0.0012	SI	0.0022	0.0022	SI
	3	0.0000	0.0000	SI	0.0006	0.0006	SI
CERRO DE PASCO	1	0.0096	0.0096	NO	0.0383	0.0383	NO
	2	0.0012	0.0012	SI	0.0017	0.0017	SI
	3	0.0012	0.0012	SI	0.0009	0.0009	SI
AREQUIPA	1	0.0096	0.0096	NO	0.0099	0.0099	NO
	2	0.0014	0.0014	SI	0.0007	0.0007	SI
	3	0.0015	0.0015	SI	0.0015	0.0015	SI

Como se observa en la tabla 15, derivas calculadas superan el valor máximo permisible de la Norma E.030 en el primer nivel para todos los registros sísmicos usados. Sin embargo, en los siguientes niveles esta deriva es inferior al permisible, aunque es suficiente con considerar que el desplazamiento es excesivo en el primer nivel para asumir que la estructura fallaría en un eventual sismo de esas características.

Tabla 16. Resumen de derivas calculadas para los registros sísmicos ajustados espectralmente

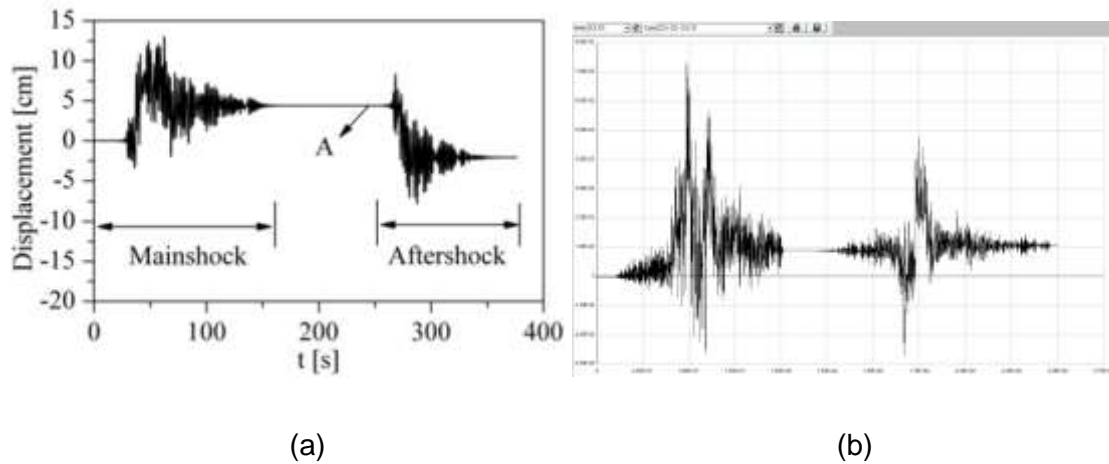
SISMO	NIVEL	ESTE - OESTE		CUMPLE	NORTE - SUR		CUMPLE
		SIN REPLICA	CON RÉPLICAS		SIN REPLICA	CON RÉPLICAS	
AREQUIPA	1	0.0290	0.0290	NO	0.0329	0.0329	NO
	2	0.0032	0.0032	SI	0.0001	0.0001	SI
	3	0.0001	0.0001	SI	0.0005	0.0005	SI
COQUIMBO	1	0.0204	0.0204	NO	0.0194	0.0194	NO
	2	0.0024	0.0024	SI	0.0002	0.0002	SI
	3	0.0001	0.0001	SI	0.0018	0.0018	SI
IQUIQUE	1	0.0329	0.0329	NO	0.0324	0.0324	NO
	2	0.0029	0.0029	SI	0.0006	0.0006	SI
	3	0.0003	0.0003	SI	0.0029	0.0029	SI
LIMA	1	0.0112	0.0112	NO	0.0115	0.0115	NO
	2	0.0020	0.0020	SI	0.0000	0.0000	SI
	3	0.0000	0.0000	SI	0.0021	0.0021	SI
MAULE	1	0.0173	0.0173	NO	0.0198	0.0198	NO
	2	0.0020	0.0020	SI	0.0001	0.0001	SI
	3	0.0001	0.0001	SI	0.0014	0.0014	SI
TOCOPILLA	1	0.0123	0.0123	NO	0.0119	0.0119	NO
	2	0.0018	0.0018	SI	0.0006	0.0006	SI
	3	0.0001	0.0001	SI	0.0006	0.0006	SI
VALPARAISO	1	0.0089	0.0089	NO	0.0092	0.0092	NO
	2	0.0017	0.0017	SI	0.0002	0.0002	SI
	3	0.0020	0.0020	SI	0.0021	0.0021	SI

La tabla 16 muestra los valores de derivas calculados luego de realizado el análisis no lineal tiempo historia con los registros sísmicos ajustados espectralmente al peligro sísmico de la zona donde se ubica la institución educativa en estudio. Se observa que al igual que con los sismos escalados, en todos los casos los valores obtenidos superan al máximo permisible que indica la normativa en el primer nivel, aunque en los niveles siguientes se tiene valores menores. Sin embargo, al tener estos valores de derivas en el primer nivel, se puede deducir que la estructura fallará en un eventual sismo de esas condiciones.

En cuanto a los antecedentes de la investigación, los resultados obtenidos son comparables con lo encontrado por Zhai, C. et al (2013), donde se muestra que en

presencia de réplicas existe un desplazamiento adicional de la estructura, aunque no necesariamente superior al máximo desplazamiento alcanzado por el sismo principal.

Figura 64. Efectos de réplicas sísmicas sobre desplazamientos



Nota: (a) Resultados de Zhai, C. et al (2013) (b) resultados de desplazamientos obtenidos en esta investigación.

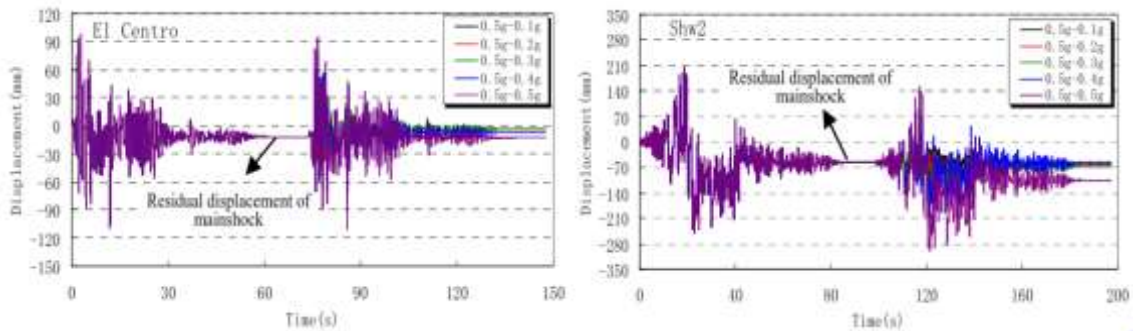
En la figura 64, a la izquierda se puede notar los resultados encontrados para desplazamientos en Zhai, C. et al (2013) en una edificación de concreto armado y a la derecha los resultados de desplazamientos obtenidos en la presente investigación para el registro sísmico de Ica. En general, se puede comparar la serie de tiempo de desplazamientos ya que se observa que luego del sismo principal ocurre un silencio sísmico y luego la réplica sísmica genera un desplazamiento adicional en la estructura.

No obstante, en Zhai, C. et al (2013) se observa que el desplazamiento originado por la réplica sísmica supera al desplazamiento máximo alcanzado en el sismo principal. Pero en todos los resultados de los registros usados en esta investigación, se encontró que el desplazamiento máximo alcanzado durante el sismo principal no es superado por el desplazamiento originado por la réplica.

De igual forma, comparando con lo encontrado por W. Huang, J. Qian & Q.S. Fu (2014), se observa resultados similares en cuanto a la serie de desplazamientos en una

estructura de tres niveles de concreto armado calculado para la acción de registros sísmicos con réplicas.

Figura 65. Efectos de réplicas sísmicas sobre desplazamientos de un edificio de concreto armado



Nota: W. Huang, J. Qian & Q.S. Fu (2014)

Como se observa en la figura 65, el comportamiento en la serie de tiempo es similar a lo encontrado en la presente tesis. Durante la ocurrencia del sismo principal se producen desplazamientos de la estructura para cada aceleración sísmica en función al incremento de tiempo. Luego de ocurrido el sismo principal, hay un intervalo de tiempo (*time gap*) donde no hay movimiento debido a que no existe aceleración sísmica. Este tiempo de no ocurrencia de sismo precede a la aparición de la réplica, la cual origina nuevos desplazamientos en la estructura.

Asimismo, W. Huang, J. Qian & Q.S. Fu (2014) en sus conclusiones señalan que “*las secuencias de replicas no incrementan significativamente las demandas de derivas en la estructura*”, lo cual coincide con lo encontrado en la presente tesis, ya que las réplicas sísmicas no generaron desplazamientos superiores al calculado con el sismo principal.

En cuanto al uso de las metodologías de escalamiento y ajuste espectral de registros sísmicos. Se ha encontrado que al usar el procedimiento de ajuste espectral se ha calculado una respuesta promedio mayor en términos de derivas en ambas direcciones superior al 30% que al usar registros sísmicos solo escalados. Esto sugiere que, al emplear registros sísmicos ajustados espectralmente, se sobreestima la respuesta

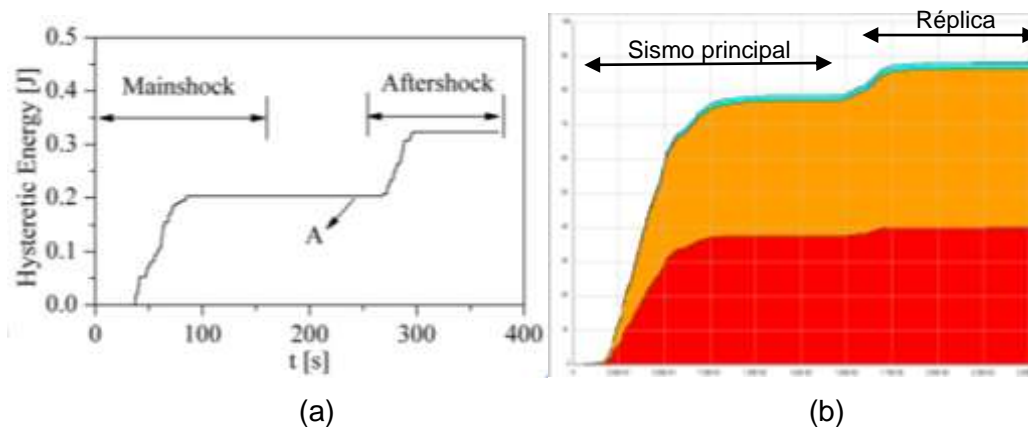
estructural por lo que esta metodología es muy conservadora y posiblemente menos precisa.

### 5.2.2 Índice de daño

Como se ha visto en los gráficos de las figuras 59 y 61, en todos los sismos empleados se ha calculado un mayor índice de daño para la estructura sometida a registros sísmicos con réplicas respecto al uso del sismo principal.

Por otro lado, los resultados obtenidos son comparables con lo encontrado por Zhai, C. et al (2013), sobre el cálculo de daño con la energía disipada de la estructura en donde se aprecia un salto en la energía histerética disipada debido a la acción de la réplica como se observa en la siguiente figura.

Figura 66. Efectos de réplicas sísmicas sobre energía disipada



Nota: (a) se observa el cálculo de la energía disipada en una estructura de concreto armado sometido a registros sísmicos con réplicas, Zhai, C. et al (2013) (b) se observa la disipada calculada en el software Perform 3D en esta investigación.

Este salto en la energía disipada demuestra que durante la ocurrencia de una réplica sísmica la estructura llega a disipar más energía debido a las aceleraciones del registro y a la amortiguación de la edificación. Esto nos indica que la estructura puede ir acumulando daño durante su periodo de vida útil debido a la energía disipada por varios sismos en diferentes tiempos.

Respecto a los resultados de índice de daño, W. Huang, J. Qian & Q.S. Fu (2014) utilizan el mismo índice de daño de Park y Ang que la presente investigación. Sus resultados muestran similitudes, pues se tiene que para los registros con réplicas sísmicas el índice de daño estimado es mayor en un promedio del 50% al calculado considerando el sismo principal, aunque este porcentaje depende de la magnitud de los registros sísmicos usados, así como del espectro objetivo. En esta investigación se encontró una diferencia de máxima de 12.60% para los registros escalados.

En cuanto al uso de las metodologías de modificación de registros sísmicos, se ha calculado resultados más altos de índice de daño para las señales sísmicas ajustadas espectralmente. En promedio se tiene una diferencia de 22.89% para sismos únicos y 20.03% para sismos con réplicas entre ambas metodologías. Nuevamente se puede afirmar que el método de ajuste espectral sobreestima la respuesta estructural comparado con la metodología de escalamiento, la cual parece ser más precisa ya que considera sismos que hayan sido registrados en el mismo tipo de suelo que la estructura a estudiar, condición que no es necesaria en el método de ajuste espectral. Adicionalmente, el método de ajuste espectral modifica el contenido de frecuencias de los registros sísmicos por lo que varios investigadores critican su precisión.

### **5.2.3 Variables que influyen en el análisis sísmico.**

Hay varias variables que no se han tratado a profundidad en la presente investigación y que deber ser mencionadas por ser parámetros que ayudan a reducir la incertidumbre en el análisis sísmico.

#### **a) Resistencia a compresión**

La resistencia a compresión del concreto es una variable aleatoria que debe controlarse en lo posible, y puede variar en distintos elementos estructurales por muchos factores. Si bien es cierto, el ensayo de esclerometría nos da valores relacionados a la resistencia, este ensayo tiene desventajas. Una opción para dar mayor precisión al

modelo es emplear datos obtenidos de ensayos de diamantina, los cuales son más confiables. Sin embargo, es importante tener presente la variabilidad en el parámetro de resistencia para entender mejor los resultados de esta investigación, así como sus limitaciones.

#### **b) Modelo no lineal seleccionado**

El modelo no lineal usado para representar el comportamiento inelástico de los elementos estructurales de la edificación es un modelo trilineal con degradación de energía en base a parámetros construidos a partir de un análisis seccional según está definido en el software Perform 3D. No obstante, como se ha visto en el marco teórico, hay muchos modelos no lineales que pueden ser aplicables como el modelo bilineal o el modelo de Takeda. Considerar un adecuado modelo de comportamiento no lineal influye en los resultados obtenidos, ya que la respuesta en términos de deformación y energía disipada depende de dicho modelo no lineal cuando la estructura es sometida a un evento sísmico e incursiona en el rango inelástico. Se debe entender que esta variable es muy importante y debería ser estudiada a profundidad en posteriores investigaciones.

#### **c) Magnitud y distancia epicentral**

La magnitud y la distancia epicentral son variables aleatorias que caracterizan a los registros sísmicos medidos en diferentes estaciones sísmicas. En esta investigación no se ha usado sismos de la misma magnitud debido a la dificultad de encontrar la cantidad de registros necesarios. Es importante considerar que la magnitud local (MI) que es la que se muestra en cada registro sísmico representa la energía liberada en un sismo y depende de la amplitud máxima registrada. En esta investigación se han empleado registros sísmicos desde magnitud 4 hasta magnitud 8, con diferentes distancias epicentrales, los cuales se han escalado y ajustado espectralmente a un mismo espectro objetivo. Se debe valorar la variabilidad de la magnitud de los registros usados en este



estudio y comprender que pueden encontrarse resultados similares o diferentes si se emplean registros que tengan la misma magnitud tanto para el escalamiento como para el ajuste espectral.

#### **d) Duración de registros sísmicos**

En este estudio, se han usado sismos de diferentes duraciones con sus respectivas réplicas; considerando que el software empleado (Seismosignal) para el tratamiento de señales admite registros de máximo 32768 líneas o una duración de 163.84 segundos para registros con muestreo de 200 muestras por segundo, se ha tenido especial cuidado en emplear los registros sísmicos cuya duración esté dentro de este intervalo de tiempo, y los que son poco más extensos se ha buscado el intervalo de tiempo indicado que abarque las aceleraciones máximas del registro sísmico cuidando que la gran mayoría de las aceleraciones esté incluida. Sin embargo, es necesario agregar dentro la discusión de los resultados la importancia de la duración de un registro sísmico, pues un sismo largo y de poca magnitud podría no generar mayores daños en la estructura, pero debido a su duración podría llegar a ocasionar fenómenos de fatiga en varios elementos estructurales, tema que no ha sido estudiado en esta investigación.

#### **e) Cantidad de réplicas de un sismo**

La cantidad de réplicas que puede tener un evento sísmico es una variable aleatoria, ya que no se puede predecir cuantas réplicas sucederán al sismo principal. En esta investigación, se ha considerado el estudio de una réplica por cada registro sísmico, la réplica con el pico de aceleración más alto y mayor magnitud es la que se ha seleccionado por practicidad para reducir el procedimiento de cálculo estructural que se torna demasiado extenso sabiendo que un evento sísmico puede llegar a tener cientos de réplicas. En esta investigación se ha encontrado que una réplica sísmica produce una disipación adicional de energía en la estructura respecto de aplicar solamente el sismo principal, entonces se puede inferir que muchas réplicas sísmicas producirían

disipación de energía adicional por cada réplica en una estructura. Sin embargo, esta disipación adicional sería muy pequeña en función a la magnitud de cada réplica, esto es importante porque sería una condición de la edificación que durante su periodo de vida útil estaría afectada por muchos sismos con réplicas los cuales irían generando disipación de energía y por tanto daño acumulado en su estructura.

### **5.3 Contratación de hipótesis**

- La hipótesis principal no se VALIDA, ya que el uso de registro sísmicos con réplicas sísmicas para el análisis de la respuesta estructural de la I.E. N°82030 Fernández Gil de la localidad de Paríamarca no produce variación en el desplazamiento y derivas máximas alcanzadas. No obstante, el uso de registros sísmicos con réplicas sísmicas sí aumenta el índice de daño calculado para la estructura en comparación con el índice calculado para un registro sísmico sin réplica, aunque esta diferencia es superior al 10%.

## CONCLUSIONES

Se han calculado las derivas de entrepiso máximas alcanzados por la estructura al ser sometida a sismos únicos y sismos con réplicas usando escalamiento y ajuste espectral, se encontró que las derivas promedio máximas ocurren en el primer nivel y su valor es de 0.0188 (este – oeste) y 0.0195 (norte – sur). Al comparar estos resultados con los obtenidos al incluir réplicas sísmicas se han calculado los mismos valores. Por tanto, se concluye que para todos los registros sísmicos usados la estructura alcanza su máximo desplazamiento durante el sismo principal y durante la ocurrencia de la réplica también existen desplazamientos, pero no supera el desplazamiento máximo alcanzado inicialmente, por lo que la diferencia en los máximos es cero.

En cuanto al índice de daño, se ha calculado el índice tanto para sismos únicos como para sismos con réplicas. Se ha estimado un índice de daño promedio para sismos únicos de 66.02% (escalamiento) y 88.91% (ajuste espectral). Al incorporar réplicas sísmicas se ha calculado un índice de daño promedio mayor, siendo este de 78.59% (escalamiento) y 98.62% (ajuste espectral). Por tanto, se tiene una diferencia de 9.71% y 12.57% a favor de los sismos con réplicas. Se concluye que las réplicas sísmicas tienen la influencia de aumentar el índice de daño de la estructura en comparación a usar solo el sismo principal.

Respecto al uso de las metodologías escalamiento y ajuste espectral de registros sísmicos, se ha obtenido resultados diferentes a pesar de que en ambos casos se tiene el mismo espectro objetivo. En el caso de las derivas se ha obtenido resultados en promedio mayores en un 33% en la dirección este – oeste para los sismos ajustados espectralmente y una diferencia promedio de 28% en la dirección norte – sur para los mismos sismos. Respecto al índice de daño para los sismos principales

se ha obtenido una diferencia promedio de 22.89% entre ambas metodologías, siendo mayor el índice calculado para los sismos ajustados espectralmente. Asimismo, para los sismos con réplicas se tiene una diferencia de 20.03%, siendo también mayores los resultados de los sismos ajustados espectralmente. Se puede concluir que, al realizar el ajuste espectral los registros sísmicos modificados producen una mayor respuesta estructural en la edificación que los sismos escalados.

Respecto a la precisión de los resultados, se debe prestar especial atención a las variables aleatorias mencionadas en la discusión de resultados como la resistencia a compresión, el modelo no lineal, la magnitud y distancia epicentral, duración de los sismos y la cantidad de réplicas. Estas variables es importante tenerlas presentes porque son parámetros que influyen en la respuesta estructural de la edificación sometida a todo un procedimiento que implica incertidumbre en el cálculo, tanto por el modelo estructural que representa una edificación real como por la demanda sísmica. Considerar estas variables en posteriores investigaciones ayudaría a reducir el sesgo y mejorar la confiabilidad de los resultados.

Finalmente, se puede agregar que las réplicas sísmicas sí influyen en la respuesta de una estructura. En esta investigación se ha estudiado el índice de daño mostrando que cuando se incluyen replicas sísmicas hay un aumento de este parámetro. En general, se puede decir que todas las estructuras al están sometidas a diversos sismos durante su periodo de vida útil, con cada sismo va acumulando daño por la disipación de energía. Esto debería considerarse en futuros estudios de evaluación de estructuras, es decir, se debería tener en cuenta el daño previo de la estructura en función a los años en funcionamiento, sobre todo en edificaciones esenciales como las instituciones educativas que albergan muchas vidas.

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda tratar las variables resistencia a compresión, el modelo no lineal, la magnitud y distancia epicentral, duración de los sismos y la cantidad de réplicas en futuras investigaciones sobre el tema.
- Se recomienda ampliar el estudio considerando un análisis probabilístico para validar las diferencias en los resultados de usar las metodologías de escalamiento y ajuste espectral para la modificación de señales sísmicas.
- En investigaciones similares se recomienda considerar la inclusión de disipadores sísmicos en el análisis, pues en esta investigación se muestra que las réplicas sísmicas pueden no generar un desplazamiento mayor al alcanzado durante el sismo principal, pero el índice de daño acumulado sí aumenta en todos los casos debido a la disipación de energía. Sería importante conocer si la disipación ofrecida por los disipadores limita la energía disipada de la estructura cuando se consideran réplicas sísmicas en su evaluación.

## REFERENCIAS

1. Admuthe, S. (2018). Semi-rigid steel frames subjected to mainshock **aftershock** earthquake sequences. Thesis Master of Science. Colorado State University. Consultado 18 en. 2019. Recuperado de: [https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/189411/Admuthe\\_colos\\_tate\\_0053N\\_14795.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/189411/Admuthe_colos_tate_0053N_14795.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
2. Abrahamson, N. y Altik L. (2010). An Improved Method for Nonstationary Spectral Matching. *Earthquake Spectra*. Vol 3. pp 601 – 617. DOI: <https://doi.org/10.1193/1.345915>.
3. ASCE (American Society of Civil Engineer). (2021). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ACSE 7-22. Standard. Virginia. Estados Unidos.
4. Burdette, N. et al (2008). Effect of Asynchronous Earthquake Motion on Complex Bridges. I: Methodology and Input Motion. *Journal of Bridge Engineering*, Vol. SN, pp. 159 – 165. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0702(2008)13:2(158)
5. Carreño, et al (1999). Registro y Tratamiento de Acelerogramas. *Física de la Tierra*, Vol. 11, pp. 81 – 111.
6. Calaveri, L. et al (2013). Analysis of Local Shear Effects in Brick Masonry Infilled RC Frames. 10.7712/120113.4715.C1533.
7. Chang, Z. et al (2013). Damage spectra for the mainshock-**aftershock** sequence- type ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 45. pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.soildyn.2012.10.001.
8. Coolgeography (2020). Causes and characteristics of Earthquakes. [En línea]. Recuperado de: <https://www.coolgeography.co.uk/A-level/AQA/Year%2013/Plate%20Tectonics/Earthquakes/Causes%20&%20Characteristics.htm>
9. Deka. B. et al. 2014. Damage Assessment of RC Frame Structures under Long Duration **Aftershock** Ground Motions. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. Vol. 3, Issue 9. DOI: 10.1080/13632469.2012.663154.
10. FEMA 356. (2000). Prestandard and commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C.

11. Freeman, A. (2007). Response Spectra as a Useful Design and Analysis Tool for Practicing Structural Engineers. *Journal of Earthquake Technology*, Vol. 44, pp. 25 – 37.
12. Guglielmi, A. (2016). Interpretation of the Omori Law. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, Vol. 5, pp. 01-05.
13. Han, R. et al. (2015). Assessment of Seismic Performance of Buildings with Incorporation of **Aftershocks**. *Journal of Seismic Performance of Constructed Facilities*. 29. 04014088. 10.10641/(ASCE)CF.1943-5509.0000596. DOI: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000596.
14. Hatari, M. et al. (2019). Correlation of ground motion duration with its intensity metrics: A simulation-based approach. Department of Civil Engineering, University of Science and Culture. Iran. DOI: 10.22115/SCCE.2020.227576.1207.
15. Herraiz, M. (2006). *Conceptos Básicos de Sismología para Ingenieros*. CISMID.
16. Huang, W. y Qian, J. (2014). Damage Assessment of RC Frame Structures under Mainshock-Aftershock Seismic Sequences. Tongji University, P.R. China. DOI:10.13197/j.eeev.2014.03.1.zhangpz.001
17. Ibraim, S., Farrukh, S. y Hashmath, M. (2017). Response Spectrum And Time History Analysis Of A Multistoried And Commercial Building. *Global Journal of Engineering Science and Researches*, vol. 3, pp.35 – 38.
18. Inel, M. y Baytan, H. (2006). Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings. *Engineering Structures*, Vol (28), pp.1494 – 1502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.01.017>.
19. Iervolino, I., Chioccarelli, E. y Susuki, A. (2019). Seismic damage accumulation in multiple mainshock– aftershock sequences. *Earthquake Engineering Structure Dynamics*. 2020; 1-21. <https://doi.org/10.1002/eqe.3275>
20. Jalayer, F. (2016). Seismic risk assessment considering cumulative damage due to **aftershocks**. Department of Structures for Engineering and Architecture, University of Naples Federico II, Naples, Italy. DOI: 10.1002/eqe.2792
21. Kayal, J. (2016). *Seismic Waves and Earthquake Location*. Geological survey of India, Vol. 27. Pp.01-42.
22. Kori, J. (s.f.). *Seismic Response Spectrum [Diapositiva de Power Point]*. Govt. Engineering College, Haveri-581110. Recuperado de:

<https://docplayer.net/60733083-Seismic-response-spectrum-by-dr-jagadish-g-kori-professor-head-civil-engineering-department-govt-engineering-college-haveri.html>.

23. Kuznetsov, S. (2011). Seismic Waves and Seismic Barriers. Acoustical Physics, Vol. 57.pp. 420 – 426.
24. Labbé, P. (2019). Should we go ahead with the Response Spectrum? Pure and Applied Geophysics, Vol. 177, pp. 2411 – 2420.
25. Liu, M. y Stein, S. (2011). Earthquake, **Aftershocks**. Earthquakes, Source Theory. [En línea]. Recuperado de: <https://drive.google.com/drive/folders/16h-VNOClnAYloI0o0z2lpPRZ7TY225JT>
26. Macedo, J. (2013). Evaluación de la respuesta sísmica de presas de tierra en términos de la variabilidad de los espectros de diseño. Tesis Maestro en Ciencias. Lima. UNI. Consultado 09 en. 2019. Disponible en: [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1133/1/macedo\\_ej.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/1133/1/macedo_ej.pdf)
27. Massumi, A., Sadeghi, K y Ghaedi, H. (2021). The effects of mainshock-**aftershock** in successive earthquakes on the response of RC moment resisting frames considering the influence of the vertical seismic component. Ain Shams Engineering Journal, Vol 13, pp 393 – 405. DOI: 10.1016/j.asej.2020.04.005.
28. Martinelli, L. y Chesi, C. (2016). Influence of masonry infills on dynamic behavior of reinforced concrete framed structures [Tesis de Maestría publicada]. Politécnico Di Milano.
29. MINEDU (ESCALE). Tendencias. [En línea]. Recuperado de: [http://escale.minedu.gob.pe/magnitudes-ortlet/reporte/cuadro?anio=31&cuadro=575&forma=U&dpto=06&prov=0601&dist=&dre=&tipo\\_ambito=ambito-ubigeo](http://escale.minedu.gob.pe/magnitudes-ortlet/reporte/cuadro?anio=31&cuadro=575&forma=U&dpto=06&prov=0601&dist=&dre=&tipo_ambito=ambito-ubigeo)
30. Michigan Tech (2020). How are earthquakes studied? [En línea]. Recuperado de: <https://www.mtu.edu/geo/community/seismology/learn/earthquake-study/>
31. MINAM (2020). Pisco 2007: 13 años de un sismo devastador. Plataforma digital única del Estado peruano. Lima. Recuperado de: <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/294466-pisco-2007-13-anos-de-un-sismo-devastador>
32. MINEDU. (2018). ESCALE, Decisiones basadas en evidencias, resultados del censo educativo 2017: Matricula, docentes, recursos y local educativo, resultados del censo DRE y UGEL 2017. [En línea]. Recuperado de:



[http://escale.minedu.gob.pe/documents/10156/4374791/Presentacion\\_06\\_Cajamarca.pdf](http://escale.minedu.gob.pe/documents/10156/4374791/Presentacion_06_Cajamarca.pdf)

33. OTANI, S. (1980). Nonlinear Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Building Structures. Canadian Journal of Civil Engineering. Vol. 7. Pp. 333 – 344. DOI: [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(74\)90099-5](https://doi.org/10.1016/0029-5493(74)90099-5).
34. SENCICO. 2020. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, E.030 “Diseño Sismo resistente” [Primera edición digital].RM N°355-2018-Vivienda. Lima. Recuperado de: <http://www3.vivienda.gob.pe/dnc/archivos/difusion/eventos/piura/NORMA%20E030%20DISE%C3%91O%20SISMORRESISTENTE.pdf>.
35. Riga, G. y Balocchi, P. (2017). **Aftershocks** Identification and Classification. Open Journal of Earthquake Research, Vol. 6. pp. 135 – 137. DOI: 10.4236/ojer.2017.63008.
36. Roohi, M., Hernandez, E. y Rosowsky, D. (2020). Reconstructing Element-by-Element Dissipated Hysteretic Energy in Instrumented Buildings: Application to the Van Nuys Hotel Testbed. Journal of Engineering Mechanics, Vol (147), pp. 01 – 17.
37. SkyCiv. (2022). A guide to Story Drift. [En línea]. Recuperado de: <https://skyciv.com/technical/story-drift-guide/>
38. Sarma, S. (2013). Engineering Seismology. Imperial College of Science, Technology and Medicine. [En línea]. Recuperado de: <https://drive.google.com/drive/folders/16h-VNOClAYl0o0z2lpPRZ7TY225JT>.
39. Shoma, Z. y Anam, I. (2002). Nonlinear Properties of Reinforced Concrete Structures [Conferencia]. 2<sup>nd</sup> Canadian Conference on Nonlinear Solid Mechanics.
40. Takeda, T. et al (1971). Reinforced Concrete Response of Simulated Earthquakes. OHBAYASHI GUMI Technical Research Report.
41. Tesfamariam, S., et al (2015). Seismic Vulnerability of reinforced concrete frame with unreinforced masonry infill due to main shock – Aftershock earthquake sequences. Earthquake spectra vol 31, pp. 1427 – 1449. DOI: <https://doi.org/10.1193/042313EQS111M>.
42. SGD (2020). Peligro Sísmico, Perú un país altamente sísmico. [En línea]. Recuperado de: <https://www.sgp.org.pe/alerta-peru-un-pais-altamente-sismico/>

43. Sheikh, S. y Li, Y. (2006). Toward the Performance – Based Design of Confined Concrete. University of Toronto.
44. SINIA (2021). Mapa Sísmico del Perú period 1960 – 1970. [En línea]. Recuperado de: <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-sismico-peru-periodo-1960-2017>.
45. Vielma, J. (2014). Contribuciones a la evaluación de la vulnerabilidad sísmica de edificios. Monografías de ingeniería sísmica. [En línea]. Recuperado de: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjVuNPAns\\_uAhXxGbkGHdDLD1IQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fupcommons.upc.edu%2Fbitstream%2Fhandle%2F2117%2F28515%2FMIS68.pdf&usg=AOvVaw3FMi6eObnR0GVF7D2JCZDW](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjVuNPAns_uAhXxGbkGHdDLD1IQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fupcommons.upc.edu%2Fbitstream%2Fhandle%2F2117%2F28515%2FMIS68.pdf&usg=AOvVaw3FMi6eObnR0GVF7D2JCZDW)
46. Wen, W., et al (2019). Resilience loss factor for the evaluation and design considering the effects of **aftershocks**. Soil Dynamics and Earthquake Engineering vol 116, pp. 43 – 49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.10.007>.

## **ANEXOS**

## ANEXO 01: ENSAYO DE ESCLEROMETRÍA

**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN**

Laboratorio de Presión - Fuerza

**N° DE CERTIFICADO**

**MT - 0621 - 2021**

Página : 1 de 2

EXPEDIENTE : EXP - 0188AT1 - 2021  
SOLICITANTE : HERMANOS URTEAGA CONTRATISTAS SRL  
DIRECCIÓN : Jr. La Mar Nro. 224 Cajamarca - Cajamarca -  
Cajamarca

METRINDUST S.A.C. Departamento de Metrología realiza calibraciones y certificaciones metrológicas según procedimientos de calibración validados o normalizados.

**INSTRUMENTO DE MEDICIÓN : ESCLEROMETRO**  
Marca : FORNEY  
Modelo : LA-0352  
N° de Serie : 136  
Identificación : LH-EQ-ESC-001  
Energía de Impacto : 2,20 Nm  
Procedencia : No Indica  
Tipo : N  
Ubicación : No Indica

Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales e internacionales, que realizan las unidades de medida de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI).

Con el fin de asegurar la calidad de sus mediciones se le recomienda al cliente recalibrar sus instrumentos y equipos a intervalos apropiados de acuerdo al uso, conservación y mantenimiento.

**FECHA Y LUGAR DE CALIBRACIÓN**  
Fecha de calibración : 2021-02-12  
Fecha de emisión : 2021-02-13  
Lugar de calibración : Laboratorio de METRINDUST S.A.C.

Los resultados no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Este certificado de calibración solo puede ser difundido completamente y sin modificaciones. Los extractos o modificaciones requieren la autorización del Departamento de Metrología de METRINDUST S.A.C.

**MÉTODO DE CALIBRACIÓN**

Se utilizó como referencia el "Procedimiento DI-011 Procedimiento de calibración de Flexómetros" CEM-ESPAÑA.

REVISADO:




TRAMA DIGITAL

**Gamarra Rodríguez Dennis**  
Gerente Técnico

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA DE METRINDUST S.A.C.

Calle Los Jazmines Mz. G LT 13 Coo. Talavera De La Reyna - El Agustino, Lima - Perú  
Celular: 915972598 / 917607794 / 925033922 - Email: informes@metrindust.com.pe  
www.metrindust.com.pe

Certificado : MT - 0621 - 2021  
Página : 2 de 2

**CONDICIONES AMBIENTALES**

MAGNITUD	INICIAL	FINAL
Temperatura	22,8 °C	22,8 °C
Humedad relativa	67,0%	67,2%

**TRAZABILIDAD**

Trazabilidad	Patrón de Trabajo	Certificado de Calibración
CONTROLS	TEST HAMMER TYPE L AND N	20/2045

**RESULTADOS DE MEDICIÓN**

N° de Lecturas	Resultados
1	74
2	74
3	72
4	74
5	74
6	72
7	74
8	74
9	74
10	74

El error máximo permitido para el rango prescrito es  $73 \pm 2$  de la escala del indicador del martillo

**OBSERVACIONES**

Con fines de identificación de la calibración se colocó una etiqueta adhesiva ( CALIBRADO ).

**\*\*FIN DE DOCUMENTO\*\***

PROHIBIDA LA REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL DE ESTE DOCUMENTO SIN AUTORIZACIÓN ESCRITA DE METRINDUST S.A.C.

Calle Los Jazmines Mz. G LT. 13 Co. Talavera De La Reyna – El Agustino, Lima – Perú  
Celular: 915972598 / 917607794 / 925033922 – Email: informes@metrindust.com.pe  
www.metrindust.com.pe

**MÉTODO ESTÁNDAR DEL NÚMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO (ASTM C 805 97)**

Material:	<b>CONCRETO</b>
Obra:	"MEJORAMIENTO Y AMPLIACION T.E. PRIMARIA N° 82030-CARLOS FERNANDEZ GIL-PARIAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA-CAJAMARCA"
Solicitante:	<b>ING. SAMUEL AGUILAR HUAMÁN</b>
Fecha:	<b>30/05/2021</b>

N°01		
Ubicación ensayo	N° Rebote	Aceptación
COLUMNA	30	VALIDO
	30	VALIDO
	28	VALIDO
	24	VALIDO
	26	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	28	VALIDO
	30	VALIDO
	31	VALIDO
	29	VALIDO
	30	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	28	VALIDO
	28	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	28	VALIDO
	28	VALIDO

N°02		
Ubicación ensayo	N° Rebote	Aceptación
COLUMNA	28	VALIDO
	34	VALIDO
	30	VALIDO
	28	VALIDO
	32	VALIDO
	28	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	30	VALIDO
	26	VALIDO
	33	VALIDO
	32	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	24	VALIDO
	26	VALIDO

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.50
Desv. Estándar	1.98

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	29.25
Desv. Estándar	3.11

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	210.92
	KG/CM2

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	217.95
	KG/CM2

N°03		
Ubicación ensayo	N° Rebote	Aceptación
COLUMNA	31	VALIDO
	32	VALIDO
	27	VALIDO
	25	VALIDO
	25	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	28	VALIDO
	30	VALIDO
	34	VALIDO
	29	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	28	VALIDO
	27	VALIDO
	34	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	28	VALIDO
	27	VALIDO

N°04		
Ubicación ensayo	N° Rebote	Aceptación
COLUMNA	26	VALIDO
	32	VALIDO
	31	VALIDO
	26	VALIDO
	24	VALIDO
	29	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	33	VALIDO
	33	VALIDO
	24	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	24	VALIDO
	24	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	24	VALIDO
	23	VALIDO
	31	VALIDO

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	29.17
Desv. Estándar	3.10

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.00
Desv. Estándar	3.88

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	216.54
	KG/CM2

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	203.89
	KG/CM2

**MÉTODO ESTANDAR DEL NUMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO (ASTM C 805 97)**

Material:	<b>CONCRETO</b>
Obra:	"MEJORAMIENTO Y AMPLIACION I.E. PRIMARIA N° 82030-CARLOS FERNANDEZ GIL-PARIAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA-CAJAMARCA"
Solicitante:	<b>ING. SAMUEL AGUILAR HUAMÁN</b>
Fecha:	<b>30/05/2021</b>

N°05		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
COLUMNA	28	VALIDO
	29	VALIDO
	28	VALIDO
	25	VALIDO
	28	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	31	VALIDO
	25	VALIDO
	25	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	31	VALIDO
	33	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	27	VALIDO
	28	VALIDO

N°06		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
COLUMNA	31	VALIDO
	33	VALIDO
	28	VALIDO
	32	VALIDO
	33	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	30	VALIDO
	28	VALIDO
	30	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	28	VALIDO
	30	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	26	VALIDO
	28	VALIDO

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.17
Desv. Estándar	2.55

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	29.75
Desv. Estándar	2.22

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	209.51 KG/CM2
---------------------------------------------------------------------------	------------------

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	223.57 KG/CM2
---------------------------------------------------------------------------	------------------

N°07		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
COLUMNA	33	VALIDO
	31	VALIDO
	30	VALIDO
	29	VALIDO
	28	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	26	VALIDO
	29	VALIDO
	27	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	29	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	33	VALIDO
	29	VALIDO
	31	VALIDO

Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
↓ Ángulo - 90° ( )		
← Ángulo 0° ( )		
↑ Ángulo + 90° ( )		

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	29.58
Desv. Estándar	2.15

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	
Desv. Estándar	

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	217.95 KG/CM2
---------------------------------------------------------------------------	------------------

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
---------------------------------------------------------------------------	--



**MÉTODO ESTÁNDAR DEL NÚMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO (ASTM C 805 97)**

Material:	<b>CONCRETO</b>
Obra:	"MEJORAMIENTO Y AMPLIACION I.E. PRIMARIA N° 82030-CARLOS FERNANDEZ GIL-PARIAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA-CAJAMARCA"
Solicitante:	<b>ING. SAMUEL AGUILAR HUAMÁN</b>
Fecha:	<b>30/05/2021</b>

N°01		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
COLUMNA	30	VALIDO
	28	VALIDO
	33	VALIDO
	31	VALIDO
	31	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	26	VALIDO
	33	VALIDO
	26	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	32	VALIDO
	34	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	26	VALIDO
	30	VALIDO

N°02		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
COLUMNA	31	VALIDO
	33	VALIDO
	34	VALIDO
	25	VALIDO
	27	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	25	VALIDO
	28	VALIDO
	33	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	30	VALIDO
	29	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	26	VALIDO
	27	VALIDO

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	30.00
Desv. Estándar	2.89

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	29.00
Desv. Estándar	3.19

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	237.63 KG/CM2
---------------------------------------------------------------------------	------------------

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	211.62 KG/CM2
---------------------------------------------------------------------------	------------------

N°03		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
COLUMNA	28	VALIDO
	29	VALIDO
	29	VALIDO
	31	VALIDO
	30	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	30	VALIDO
	28	VALIDO
	28	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	30	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	25	VALIDO
	26	VALIDO
	33	VALIDO

N°04		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
COLUMNA	31	VALIDO
	26	VALIDO
	30	VALIDO
	34	VALIDO
	29	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	32	VALIDO
	32	VALIDO
	25	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	26	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	26	VALIDO
	32	VALIDO
	34	VALIDO

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.92
Desv. Estándar	2.15

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	29.75
Desv. Estándar	3.28

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	210.92 KG/CM2
---------------------------------------------------------------------------	------------------

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	224.98 KG/CM2
---------------------------------------------------------------------------	------------------



**MÉTODO ESTÁNDAR DEL NUMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO (ASTM C 805 97)**

Material:	<b>CONCRETO</b>
Obra:	"MEJORAMIENTO Y AMPLIACION I.E. PRIMARIA N° 82030-CARLOS FERNANDEZ GIL-PARIAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA-CAJAMARCA"
Solicitante:	<b>ING. SAMUEL AGUILAR HUAMÁN</b>
Fecha:	<b>30/05/2021</b>

N°01		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
VIGA	26	VALIDO
	26	VALIDO
	30	VALIDO
	29	VALIDO
	31	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	25	VALIDO
	28	VALIDO
	30	VALIDO
	29	VALIDO
	27	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	29	VALIDO
	27	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	29	VALIDO
	28	VALIDO

N°02		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
VIGA	25	VALIDO
	33	VALIDO
	34	VALIDO
	26	VALIDO
	26	VALIDO
	25	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	28	VALIDO
	33	VALIDO
	30	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	29	VALIDO
	27	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	27	VALIDO
	27	VALIDO

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.17
Desv. Estándar	1.85

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.58
Desv. Estándar	3.23

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	210.92
	KG/CM2

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	211.69
	KG/CM2

N°03		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
VIGA	29	VALIDO
	29	VALIDO
	30	VALIDO
	30	VALIDO
	30	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	31	VALIDO
	27	VALIDO
	28	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	30	VALIDO
	25	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	26	VALIDO
	31	VALIDO

N°04		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
VIGA	30	VALIDO
	26	VALIDO
	30	VALIDO
	32	VALIDO
	29	VALIDO
	32	VALIDO
↓ Ángulo - 90° ( )	31	VALIDO
	25	VALIDO
← Ángulo 0° ( )	26	VALIDO
	27	VALIDO
↑ Ángulo + 90° ( )	28	VALIDO
	34	VALIDO

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.83
Desv. Estándar	1.95



Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	29.17
Desv. Estándar	2.82



DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	214.43
	KG/CM2

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	222.87
	KG/CM2

**MÉTODO ESTÁNDAR DEL NÚMERO DE REBOTE DEL CONCRETO ENDURECIDO (ASTM C 805 97)**

Material:	<b>CONCRETO</b>
Obra:	"MEJORAMIENTO Y AMPLIACION T.E. PRIMARIA N° 82030-CARLOS FERNANDEZ GIL-PARIAMARCA, PROVINCIA DE CAJAMARCA-CAJAMARCA"
Solicitante:	<b>ING. SAMUEL AGUILAR HUAMÁN</b>
Fecha:	<b>30/05/2021</b>

N°01			
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación	
VIGA	26	VALIDO	
	27	VALIDO	
	29	VALIDO	
	29	VALIDO	
	31	VALIDO	
 Ángulo - 90° ( )	26	VALIDO	
	29	VALIDO	
	30	VALIDO	
	28	VALIDO	
	27	VALIDO	
	 Ángulo + 90° ( )	29	VALIDO
		29	VALIDO



N°02		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
VIGA	31	VALIDO
	32	VALIDO
	30	VALIDO
	25	VALIDO
	27	VALIDO
	25	VALIDO
 Ángulo - 90° ( )	29	VALIDO
	31	VALIDO
	30	VALIDO
 Ángulo + 90° ( )	30	VALIDO
	30	VALIDO
	28	VALIDO
27	VALIDO	



Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.33
Desv. Estándar	1.56

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.75
Desv. Estándar	2.34

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	212.32
	KG/CM2

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	213.73
	KG/CM2

N°03		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
VIGA	28	VALIDO
	29	VALIDO
	29	VALIDO
	31	VALIDO
	30	VALIDO
 Ángulo - 90° ( )	30	VALIDO
	28	VALIDO
	28	VALIDO
 Ángulo + 90° ( )	30	VALIDO
	25	VALIDO
	26	VALIDO
	33	VALIDO

N°04		
Ubicación ensayo	N°Rebote	Aceptación
VIGA	31	VALIDO
	26	VALIDO
	30	VALIDO
	34	VALIDO
	29	VALIDO
	32	VALIDO
 Ángulo - 90° ( )	32	VALIDO
	25	VALIDO
	26	VALIDO
 Ángulo + 90° ( )	26	VALIDO
	32	VALIDO
	34	VALIDO

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	28.92
Desv. Estándar	2.15

Datos del ensayo de esclerometría	
Promedio	29.75
Desv. Estándar	3.28

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	215.14
	KG/CM2

DATO DEL N° DE REBOTE - RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO DEL GRÁFICO	
	228.49
	KG/CM2

**PANEL FOTOGRAFICO  
ENSAYOS DE ESCLEROMETRÍA**



FOTO N° 01



FOTO N° 02



FOTO N° 03



FOTO N° 04



FOTO N° 05



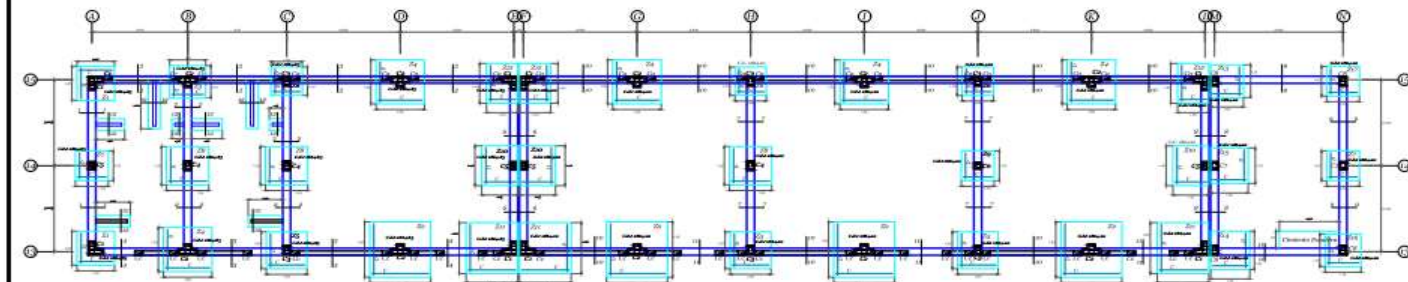
FOTO N° 06

## **ANEXO 02: PLANOS**



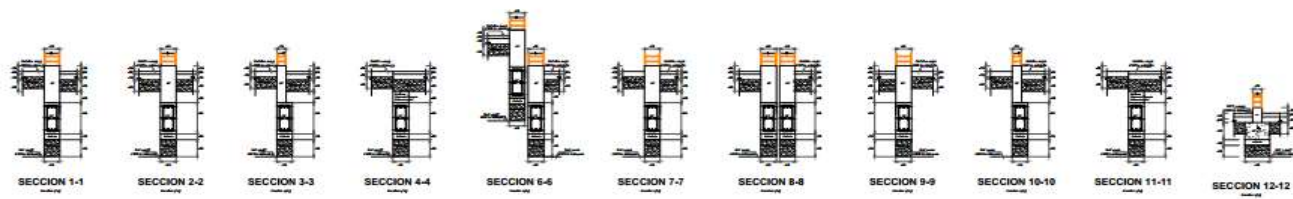






INDICACIONES SIMBOLICAS	INDICACIONES TECNICAS
1. Material de construcción	2. Estructura
3. Estructura	4. Estructura
5. Estructura	6. Estructura
7. Estructura	8. Estructura
9. Estructura	10. Estructura
11. Estructura	12. Estructura
13. Estructura	14. Estructura
15. Estructura	16. Estructura
17. Estructura	18. Estructura
19. Estructura	20. Estructura
21. Estructura	22. Estructura
23. Estructura	24. Estructura
25. Estructura	26. Estructura
27. Estructura	28. Estructura
29. Estructura	30. Estructura
31. Estructura	32. Estructura
33. Estructura	34. Estructura
35. Estructura	36. Estructura
37. Estructura	38. Estructura
39. Estructura	40. Estructura
41. Estructura	42. Estructura
43. Estructura	44. Estructura
45. Estructura	46. Estructura
47. Estructura	48. Estructura
49. Estructura	50. Estructura
51. Estructura	52. Estructura
53. Estructura	54. Estructura
55. Estructura	56. Estructura
57. Estructura	58. Estructura
59. Estructura	60. Estructura
61. Estructura	62. Estructura
63. Estructura	64. Estructura
65. Estructura	66. Estructura
67. Estructura	68. Estructura
69. Estructura	70. Estructura
71. Estructura	72. Estructura
73. Estructura	74. Estructura
75. Estructura	76. Estructura
77. Estructura	78. Estructura
79. Estructura	80. Estructura
81. Estructura	82. Estructura
83. Estructura	84. Estructura
85. Estructura	86. Estructura
87. Estructura	88. Estructura
89. Estructura	90. Estructura
91. Estructura	92. Estructura
93. Estructura	94. Estructura
95. Estructura	96. Estructura
97. Estructura	98. Estructura
99. Estructura	100. Estructura

CIMENTACIONES - MODULO A Y ESCALERA



Tip	Ar	Ar	B	C	D
1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1
33	1	1	1	1	1
34	1	1	1	1	1
35	1	1	1	1	1
36	1	1	1	1	1
37	1	1	1	1	1
38	1	1	1	1	1
39	1	1	1	1	1
40	1	1	1	1	1
41	1	1	1	1	1
42	1	1	1	1	1
43	1	1	1	1	1
44	1	1	1	1	1
45	1	1	1	1	1
46	1	1	1	1	1
47	1	1	1	1	1
48	1	1	1	1	1
49	1	1	1	1	1
50	1	1	1	1	1
51	1	1	1	1	1
52	1	1	1	1	1
53	1	1	1	1	1
54	1	1	1	1	1
55	1	1	1	1	1
56	1	1	1	1	1
57	1	1	1	1	1
58	1	1	1	1	1
59	1	1	1	1	1
60	1	1	1	1	1
61	1	1	1	1	1
62	1	1	1	1	1
63	1	1	1	1	1
64	1	1	1	1	1
65	1	1	1	1	1
66	1	1	1	1	1
67	1	1	1	1	1
68	1	1	1	1	1
69	1	1	1	1	1
70	1	1	1	1	1
71	1	1	1	1	1
72	1	1	1	1	1
73	1	1	1	1	1
74	1	1	1	1	1
75	1	1	1	1	1
76	1	1	1	1	1
77	1	1	1	1	1
78	1	1	1	1	1
79	1	1	1	1	1
80	1	1	1	1	1
81	1	1	1	1	1
82	1	1	1	1	1
83	1	1	1	1	1
84	1	1	1	1	1
85	1	1	1	1	1
86	1	1	1	1	1
87	1	1	1	1	1
88	1	1	1	1	1
89	1	1	1	1	1
90	1	1	1	1	1
91	1	1	1	1	1
92	1	1	1	1	1
93	1	1	1	1	1
94	1	1	1	1	1
95	1	1	1	1	1
96	1	1	1	1	1
97	1	1	1	1	1
98	1	1	1	1	1
99	1	1	1	1	1
100	1	1	1	1	1

