

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**“INCORPORACIÓN DE RÉPLICAS EN EL DESEMPEÑO SÍSMICO DE  
LOS EDIFICIOS 2H Y 4F DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE  
CAJAMARCA”**

**TESIS PARA OBTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTADO POR:**

**BACH. EMERSSON BALTAZAR AGUILAR HUAMÁN**

**ASESOR:**

**DR. ING. MIGUEL ÁNGEL MOSQUERIA MORENO**

**CAJAMARCA – PERÚ 2019**

## **AGRADECIMIENTO**

*A la Universidad Nacional de Cajamarca y a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil por los conocimientos adquiridos, las maravillosas personas que he conocido y los momentos vividos a lo largo de los todos los años de estudio.*

## **DEDICATORIA**

*A Dios y a mi familia por ser la guía necesaria en mi vida.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>ii</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvii</b>
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3 HIPÓTESIS.....	3
1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....	3
1.5 ALCANCES .....	3
1.6 DELIMITACIÓN .....	4
1.7 OBJETIVOS .....	4
1.8 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.....	5
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>6</b>
2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	6
2.2 BASES TEÓRICAS.....	8
2.2.1 TECTONICA MUNDIAL .....	8
2.2.2 SISMOS TECTÓNICOS .....	12
2.2.3 RÉPLICAS.....	12
2.2.4 ONDAS SÍSMICAS .....	13
2.2.5 REGISTROS SÍSMICOS .....	14
2.2.6 SISMICIDAD EN PERÚ.....	18
2.2.7 AJUSTE ESPECTRAL DE REGISTROS SÍSMICOS .....	24
2.2.8 ANÁLISIS DINÁMICO .....	34
2.2.9 DESEMPEÑO SÍSMICO .....	43
2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS .....	46
<b>CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>47</b>
3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	47
3.2 ÉPOCA DE INVESTIGACIÓN .....	48

3. 3 PROCEDIMIENTO .....	48
3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS EDIFICACIONES EN ESTUDIO .....	48
3.3.2 ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO .....	51
3.3.2.1 PELIGRO SÍSMICO EN LA ZONA DE ESTUDIO .....	54
3.3.2.2 REGISTROS SÍSMICOS .....	55
3.3.2.3 AJUSTE ESPECTRAL DE SISMOS PRINCIPALES Y ESCALAMIENTO DE RÉPLICAS.....	64
3.3.3 MODELOS COMPUTACIONALES DE LAS EDIFICACIONES.....	76
3.3.4 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL.....	86
3.3.5 ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO.....	87
3.4 TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS..	88
3.4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN .....	88
3.4.2 TIPO DE ANÁLISIS .....	88
3.4.3 RECOLECCIÓN DE DATOS.....	88
3.4.4 PROCESAMIENTO DE DATOS .....	88
3.4.5 ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	89
<b>CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>90</b>
4.1 DERIVAS Y DESPLAZAMIENTOS DE ENTREPISO .....	90
4.1.1 EDIFICIO 2H.....	90
4.1.2 EDIFICIO 4F .....	100
4.1.3 DIFERENCIAS EN LAS RESPUESTAS ESTRUCTURALES .....	109
4.2 ÍNDICE DE DAÑO .....	117
4.2.1 EDIFICIO 2H.....	117
4.2.2 EDIFICIO 4F .....	125
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>133</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	133
5.2 RECOMENDACIONES.....	134
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>135</b>
<b>ANEXO 01: METRADO DE CARGAS Y MASAS.....</b>	<b>139</b>
<b>ANEXO 02: SECUENCIAS SÍSMICAS.....</b>	<b>147</b>
<b>ANEXO 03: PLANOS.....</b>	<b>153</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N°01:</b> Placas tectónicas, naturaleza e interacción de sus bordes (las flechas indican la dirección del movimiento).	8
<b>Figura N°02:</b> Actividad sísmica en el mundo (los puntos representan los epicentros de los sismos)	9
<b>Figura N°03:</b> Ilustración de los procesos de interacción de placas: bordes de transformación de placas (transform fault boundary), bordes de extensión de cresta (spreading ridge boundary) y bordes de subducción (subduction zone boundary)	10
<b>Figura N°04:</b> Diagramas que muestran los dos modos de subducción propuestos (a) Alto estrés (Chilena) (b) Bajo Estrés (Mariana)	11
<b>Figura N°05:</b> Deformaciones producidas por ondas de cuerpo, ondas-P y ondas-S; y ondas de superficie, ondas Rayleigh y ondas Love.	13
<b>Figura N°06:</b> Componente este-oeste (EW), norte-sur (NS) y vertical (UD) de la aceleración de terreno registrada en la estación Cesar Vizcarra Vargas MOQ001 durante el sismo de Arequipa el 23/06/2001	14
<b>Figura N°07:</b> Parámetros de amplitud de la componente norte-sur de la aceleración horizontal del terreno registrada durante del sismo de Valle Imperial de 18/05/1940.	16
<b>Figura N°08:</b> Influencia del contenido de frecuencia del sismo y el periodo de vibración de la estructura.	17
<b>Figura N°09:</b> Sismicidad histórica en el Perú (1960-2012) sismos de profundidad superficial y sismos de profundidad intermedia.	19
<b>Figura N°10:</b> Principales elementos tectónicos superficiales presentes en el borde oeste de Perú.	20
<b>Figura N°11:</b> Esquema 3D del proceso de subducción frente al borde oeste del Perú, los números 1 y 3 indican las áreas de mayor deformación debido a la mayor ocurrencia de sismos.	21
<b>Figura N°12:</b> Distribución espacial de las 127 réplicas del terremoto del 03 de Octubre de 1974. La estrella más superior representa el sismo principal y la otra la réplica principal del 09 de noviembre del mismo año. Los círculos representan las réplicas de acuerdo a su tamaño.	22
<b>Figura N°13:</b> Distribución espacial de las réplicas del terremoto de Arequipa 06/06/2001 ocurridas entre 28 de junio y 19 de julio. Las estrellas representan el epicentro del terremoto principal y las tres réplicas de mayor magnitud.	23

<b>Figura N°14:</b> Distribución espacial de las réplicas, asociadas en tres grupos, del sismo de Pisco ocurridas entre los días 15 al 21 de agosto de 2007	23
<b>Figura N°15:</b> Proceso de ajuste espectral de acelerogramas o registros sísmicos.	24
<b>Figura N°16:</b> Interfaz de SeismoMatch. Se observa las entradas de acelerogramas, definición de espectro objetivo y las salidas (acelerograma original y ajustado espectralmente)	25
<b>Figura N°17:</b> Proceso de escalamiento de réplicas con respecto al sismo principal, se mantienen las relaciones entre PGA en cada caso	26
<b>Figura N°18:</b> Espectros elástico e inelástico (reducido)	30
<b>Figura N°19:</b> Esquema general del análisis dinámico (tiempo historia).	34
<b>Figura N°20:</b> Modelo de esfuerzo-deformación de concreto en compresión	36
<b>Figura N°21:</b> Relaciones fuerza-deformación para componentes estructurales de diferentes materiales: (a) acero estructural, (b) concreto armado y (c) albañilería.	37
<b>Figura N°22:</b> Modelo Bilineal de los ciclos de histéresis	37
<b>Figura N°23:</b> Modelo histerético de Takeda	38
<b>Figura N°24:</b> Modelo histerético trilinear	39
<b>Figura N°25:</b> (a) “Backbone curve” para un comportamiento histerético, (b) Idealización	39
<b>Figura N°26:</b> Versión modificada de ASCE 41 curva fuerza-deformación. Los puntos mostrados son: cedencia efectiva (punto B), resistencia pico (C), resistencia residual (D), y deformación última (E)	40
<b>Figura N°27:</b> Relación fuerza-deformación en Perform-3D	40
<b>Figura N°28:</b> Lazo de histéresis con degradación y sin degradación de rigidez	41
<b>Figura N°29:</b> Tipos de modelos no lineales para análisis estructural (columnas y vigas). Los modelos que distribuyen la plasticidad son los de (a) elementos finitos y (b) secciones de fibra; y los de plasticidad concentrada (b) rótulas plásticas.	42
<b>Figura N°30:</b> Ubicación del área de estudio en el mapa de zonificación sísmica del Perú	47
<b>Figura N°31:</b> Ubicación de edificio 2H y 4F dentro del campus de la Universidad Nacional de Cajamarca en coordenadas UTM WGS 84	48
<b>Figura N°32:</b> Fotografías de edificio 2H: (a) Vista Frontal (b) Vista Posterior	49
<b>Figura N°33:</b> Fotografías de edificio 4F: (a) Vista Posterior (b) Vista Frontal	50
<b>Figura N°34:</b> Esquema general de la metodología seguida en este estudio	52
<b>Figura N°35:</b> Espectros de respuesta para sismo frecuente, ocasional, raro y muy raro	54

<b>Figura N°36:</b> Sismos principales (mainshocks) componente EW: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.	57
<b>Figura N°37:</b> Réplicas (aftershocks) componente EW: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.	58
<b>Figura N°38:</b> Sismos principales (mainshocks) componente NS: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 015.	59
<b>Figura N°39:</b> Réplicas (aftershocks) componente NS: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.	60
<b>Figura N°40:</b> Ubicación de los sismos usados en este estudio y sus réplicas principales	63
<b>Figura N°41:</b> Ajuste Espectral al Sismo Frecuente (componente EW): (a) Espectros de respuesta de sismos originales, (b) Espectros de respuesta de sismos ajustados	64
<b>Figura N°42:</b> Espectro promedio de registros ajustados (componente EW) y espectro objetivo (sismo frecuente)	65
<b>Figura N°43:</b> Registros ajustados espectralmente al Sismo Frecuente (Componente EW): (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015	67
<b>Figura N°44:</b> Ajuste Espectral al Sismo Frecuente (componente NS) : (a) Espectros de respuesta de sismos originales, (b) Espectros de respuesta de sismos ajustados	67
<b>Figura N°45:</b> Espectro promedio de registros ajustados (componente NS) y espectro objetivo (sismo frecuente)	68
<b>Figura N°46:</b> Registros ajustados espectralmente al Sismo Frecuente (Componente EW): (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015	70
<b>Figura N°47:</b> Esquema para la conformación de secuencias de sismos principales y réplicas con un silencio de aceleración $\Delta t$ igual a 20 segundos.	73
<b>Figura N°48 :</b> Secuencias de sismos y réplicas Componente EW (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo frecuente) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocoilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015	74



<b>Figura N°49:</b> Secuencias de sismos y réplicas Componente NS (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo ocasional) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaíso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocoilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015	75
<b>Figura N°50:</b> Modelo computacional de edificio 2H desarrollado en SAP2000: (a) vista lateral, (b) vista frontal	77
<b>Figura N°51:</b> Modelo computacional de edificio 4F desarrollado en SAP2000: (a) vista lateral, (b) vista frontal	78
<b>Figura N°52:</b> Modelo analítico de vigas y columnas usados en PERFORM-3D	79
<b>Figura N°53:</b> Ejemplo de definición de los parámetros de fuerza deformación en un modelo trilinear de vigas en PERFORM 3D	82
<b>Figura N°54:</b> Ejemplo de definición de los parámetros de fuerza deformación en un modelo e-p-p de columnas en PERFORM 3D	83
<b>Figura N°55:</b> Ejemplo de definición de los parámetros de degradación de rigidez	83
<b>Figura N°56:</b> (a), (b) Vista lateral y frontal del modelo de análisis del edificio 2H desarrollado en Perform 3D	84
<b>Figura N°57:</b> (a), (b) Vista lateral y frontal del modelo de análisis del edificio 4F desarrollado en Perform 3D	85
<b>Figura N°58:</b> Dirección de aplicación de las componentes horizontales de cada registro sísmico en las edificaciones de estudio.	86
<b>Figura N°59:</b> Respuesta estructural para análisis no lineal del edificio 2H sometido al registro sísmico de Arequipa 2001 escalado a un nivel de peligro sísmico de Sismo Ocasional (PGA=0.47g)	87
<b>Figura N°60:</b> Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de <b>Sismo Frecuente</b> en dirección ( <b>NS</b> ), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.	90
<b>Figura N°61:</b> Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de Sismo Frecuente en dirección ( <b>EW</b> ), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.	91
<b>Figura N°62:</b> Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de <b>Sismo Ocasional</b> en dirección ( <b>NS</b> ), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.	92

- Figura N°63:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 93
- Figura N°64:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 94
- Figura N°65:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. Se observa que no existen diferencias. 95
- Figura N°66:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 96
- Figura N°67:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 97
- Figura N°68:** Desempeño sísmico obtenido para el edificio 2H en la dirección NS en comparación con los resultados del estudio realizado por Orrillo (2014). SF: sismo frecuente, SO: sismo ocasional, SR: Sismo raro y SMR: Sismo muy raro. 98
- Figura N°69:** Desempeño sísmico obtenido para el edificio 2H en la dirección EW en comparación con los resultados del estudio realizado por Orrillo (2014). SF: sismo frecuente, SO: sismo ocasional, SR: Sismo raro y SMR: Sismo muy raro. 99
- Figura N°70:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. Se observa que no existen diferencias. 100
- Figura N°71:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de Sismo Frecuente en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. Se observa que no existen diferencias. 101
- Figura N°72:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 102
- Figura N°73:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en el edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. Se observa que no existen diferencias. 103

- Figura N°74:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en el edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 104
- Figura N°75:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 105
- Figura N°76:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en el edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 106
- Figura N°77:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 107
- Figura N°78:** Desempeño sísmico obtenido para el edificio 4F en la dirección EW en comparación con los resultados del estudio realizado por Bolaños (2015). SF: sismo frecuente, SO: sismo ocasional, SR: Sismo raro y SMR: Sismo muy raro. 108
- Figura N°79:** Desempeño sísmico obtenido para el edificio 4F en la dirección NS en comparación con los resultados del estudio realizado por Bolaños (2015). SF: sismo frecuente, SO: sismo ocasional, SR: Sismo raro y SMR: Sismo muy raro. 109
- Figura N°80:** Respuestas estructurales del segundo nivel del edificio 2H para todos los registro sísmicos (ajustado a un nivel de sismo raro en la dirección EW): (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015. 112
- Figura N°81:** Respuestas estructurales del segundo nivel del edificio 2H para todos los registro sísmicos (ajustado a un nivel de sismo raro en la dirección EW): (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015. 114
- Figura N°82 (a):** Ejemplo de la diferencia en la respuesta estructural obtenida para las secuencias sísmicas de Arequipa 2001 e Iquique 2014 en la dirección NS en edificio 2H. Secuencia de Arequipa 2001. Se observa que el tamaño de la réplica determina su efecto en la respuesta del edificio. 115
- Figura N°82 (b):** Ejemplo de la diferencia en la respuesta estructural obtenida para las secuencias sísmicas de Arequipa 2001 e Iquique 2014 en la dirección NS en edificio 2H. 116

Secuencia de Iquique 2014. Se observa que el tamaño de la réplica determina su efecto en la respuesta del edificio.

**Figura N°83:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 117

**Figura N°84:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 118

**Figura N°85:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 119

**Figura N°86:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 120

**Figura N°87:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 121

**Figura N°88:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 122

**Figura N°89:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 123

**Figura N°90:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 124

**Figura N°91:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 125

**Figura N°92:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 126

- Figura N°93:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en el edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas 127
- Figura N°94:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 128
- Figura N°95:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 129
- Figura N°96:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 130
- Figura N°97:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 131
- Figura N°98:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. 132

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 01:</b> Sismos recomendados para la construcción de espectros de peligro sísmico	28
<b>Tabla N°02:</b> Factores de Zona “Z”	31
<b>Tabla N°03:</b> Categoría de las Edificaciones	32
<b>Tabla N°04:</b> Clasificación de los Perfiles de Suelo	33
<b>Tabla N°05:</b> Factor d Suelo “S”	33
<b>Tabla N°06:</b> Periodos “Tp” y “TL”	33
<b>Tabla N° 07:</b> Niveles de desempeño, estado de daño correspondiente y límites de derivas.	44
<b>Tabla N° 08:</b> Niveles de desempeño relacionados al índice de daño alcanzado	45
<b>Tabla N° 09:</b> Propiedades de los materiales de los elementos estructurales de los edificios 2H y 4F	51
<b>Tabla N°10:</b> Parámetros Sísmicos Para La Construcción Del Espectro De Respuesta De La Norma E.030	53
<b>Tabla N°11:</b> Registros Sísmicos Seleccionados	56
<b>Tabla N°12:</b> Factores de escala “F” de réplicas para sismo frecuente (EW)	70
<b>Tabla N°13:</b> Factores de escala “F” de réplicas para sismo ocasional (EW)	71
<b>Tabla N°14:</b> Factores de escala “F” de réplicas para sismo raro (EW)	71
<b>Tabla N°15:</b> Factores de escala “F” de réplicas para sismo muy raro (EW)	71
<b>Tabla N°16:</b> Factores de escala “F” de réplicas para sismo frecuente (NS)	72
<b>Tabla N°17:</b> Factores de escala “F” de réplicas para sismo ocasional (NS)	72
<b>Tabla N°18:</b> Factores de escala “F” de réplicas para sismo raro (NS)	72
<b>Tabla N°19:</b> Factores de escala “F” de réplicas para sismo muy raro (NS)	72
<b>Tabla N°20:</b> Parámetros para los modelos de vigas en edificio 2H	80
<b>Tabla N°21:</b> Parámetros para los modelos de vigas en edificio 4F	80
<b>Tabla N°22:</b> Parámetros para los modelos de columnas en edificio 2H	81
<b>Tabla N°23:</b> Parámetros para los modelos de columnas en edificio 4F	81
<b>Tabla N°24:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (NS) según derivas de entrepiso	91
<b>Tabla N°25:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (EW) según derivas de entrepiso.	92
<b>Tabla N°26:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico ocasional</b> en dirección (NS) según derivas de entrepiso	93

<b>Tabla N°27:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico ocasional</b> en dirección ( <b>EW</b> ) según derivas de entrepiso.	94
<b>Tabla N°28:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico raro</b> en dirección ( <b>NS</b> ) según derivas de entrepiso	95
<b>Tabla N°29:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico raro</b> en dirección ( <b>EW</b> ) según derivas de entrepiso	96
<b>Tabla N°30:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico muy raro</b> en dirección ( <b>NS</b> ) según derivas de entrepiso	97
<b>Tabla N°31:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico raro</b> en dirección ( <b>EW</b> ) según derivas de entrepiso	98
<b>Tabla N°32:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico frecuente</b> en dirección ( <b>NS</b> ) según derivas de entrepiso	100
<b>Tabla N°33:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico frecuente</b> en dirección ( <b>EW</b> ) según derivas de entrepiso	101
<b>Tabla N°34:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico ocasional</b> en dirección ( <b>NS</b> ) según derivas de entrepiso	102
<b>Tabla N°35:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico ocasional</b> en dirección ( <b>EW</b> ) según derivas de entrepiso	103
<b>Tabla N°36:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico raro</b> en dirección ( <b>NS</b> ) según derivas de entrepiso	104
<b>Tabla N°37:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico raro</b> en dirección ( <b>EW</b> ) según derivas de entrepiso	105
<b>Tabla N°38:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico muy raro</b> en dirección ( <b>NS</b> ) según derivas de entrepiso	106
<b>Tabla N°39:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico raro</b> en dirección ( <b>EW</b> ) según derivas de entrepiso	107
<b>Tabla N°40:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico frecuente</b> en dirección ( <b>NS</b> ) según índice de daño	117
<b>Tabla N°41:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico frecuente</b> en dirección ( <b>EW</b> ) según índice de daño	118
<b>Tabla N°42:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico ocasional</b> en dirección ( <b>NS</b> ) según índice de daño	119

<b>Tabla N°43:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (EW) según índice de daño	120
<b>Tabla N°44:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico ocasional</b> en dirección (NS) según índice de daño	121
<b>Tabla N°45:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (EW) según índice de daño	122
<b>Tabla N°46:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro <b>sísmico muy raro</b> en dirección (NS) según índice de daño	123
<b>Tabla N°47:</b> Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (EW) según índice de daño	124
<b>Tabla N°48:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico frecuente</b> en dirección (EW) según índice de daño	125
<b>Tabla N°49:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico frecuente</b> en dirección (NS) según índice de daño	126
<b>Tabla N°50:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico ocasional</b> en dirección (EW) según índice de daño	127
<b>Tabla N°51:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (NS) según índice de daño	128
<b>Tabla N°52:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico ocasional</b> en dirección (EW) según índice de daño	129
<b>Tabla N°53:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (NS) según índice de daño	130
<b>Tabla N°54:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro <b>sísmico muy raro</b> en dirección (EW) según índice de daño	131
<b>Tabla N°55:</b> Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (NS) según índice de daño	132



## RESUMEN

La ubicación del Perú en una zona altamente sísmica hace necesario estudiar continuamente los efectos que los sismos producen en las edificaciones. En esta investigación se ha estudiado el comportamiento de los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca ante diferentes sismos. El objetivo ha sido estimar el efecto que produce incorporar réplicas en la evaluación de su desempeño. El procedimiento ha consistido en definir el área de estudio en la ciudad de Cajamarca y caracterizar el peligro sísmico por medio de sus espectros de respuesta para diferentes periodos de retorno. Luego se han identificado y seleccionado los registros sísmicos de bases de datos de Perú y Chile, se han ajustado espectralmente hacia los espectros de respuesta y se ha evaluado el desempeño de la estructura a partir de dos parámetros de demanda: derivas de entrepiso e índice de daño. Los resultados muestran que la incorporación de réplicas no afecta significativamente el desempeño sísmico de ambos edificios. Los máximos desplazamientos de entrepiso no se incrementan con la incorporación de réplicas para los sismos frecuentes y ocasionales, aunque estos sí se evidencian para los sismos raros y muy raros debido a que exceden la capacidad de la estructura y la llevan al colapso. Por otro lado, para todos los casos el índice de daño sí se incrementa pero esta diferencia no es significativa para alterar su desempeño.

**Palabras Clave:** *evaluación sísmica, desempeño sísmico, sismos, réplicas, índice de daño, ajuste espectral*

## ABSTRACT

The location of Peru in a highly seismic zone makes it necessary to continually study the effects that earthquakes produce on buildings. In this investigation the behavior of the 2H and 4F buildings of the National University of Cajamarca has been studied under seismic loads. The objective has been to estimate the effect of the incorporation of aftershocks in the analysis. The procedure has been to define the study area in the city of Cajamarca and characterize the seismic hazard through its response spectra for different return periods. Then, the seismic records of Peru and Chile databases have been identified and selected, they have been spectrally matched to the response spectra and the performance of the structure has been evaluated based on two demand parameters: inter-story drifts and damage index. The results show that the incorporation of aftershocks does not significantly affect the seismic performance of both buildings. The maximum inter-story drifts does not increase with the incorporation of aftershocks for frequent and occasional earthquakes, although these are evidenced for rare and very rare earthquakes because they exceed the capacity of the structure and lead to collapse. On the other hand, for all cases the damage index does increase but this difference is not significant to change its performance.

**Palabras Clave:** *seismic evaluation, seismic performance, earthquakes, aftershocks, damage index, spectral matching*

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En regiones sísmicas activas como en el Perú las estructuras civiles están sujetas a la ocurrencia de sismos durante su vida útil. Su potencial colapso conllevaría a pérdidas humanas y económicas considerables. Debido a esto, los estudios de evaluación sísmica son de vital importancia para estimar el nivel de respuesta y comportamiento frente a dichos eventos.

El enfoque de evaluación sísmica de edificios por “desempeño” permite estimar qué tan bien se desempeña una estructura ante solicitaciones sísmicas, habiendo establecido previamente niveles de comportamiento esperado. Los documentos que desarrollan este enfoque son la propuesta del SEAOC Vision 2000, el ATC-40 y el FEMA 356; que definen el desempeño en base a la medida de los desplazamientos máximos de entrepiso y el nivel de daño.

A partir de estos documentos se han elaborado diversos estudios de desempeño sísmico en todo el mundo. En el Perú se han realizado múltiples investigaciones, destaca sobre todo el aporte de Aguiar (2003) quien realizó una descripción analítica muy completa de la evaluación por desempeño mediante la metodología del análisis estático no lineal. En la Universidad Nacional de Cajamarca se han realizado algunas investigaciones, entre ellas el trabajo de Bolaños (2015) y Orrillo (2014) quienes evaluaron el desempeño sísmico de los edificios 4F y 2H de la Universidad Nacional de Cajamarca mediante la metodología del espectro de capacidad propuesta en el ATC-40.

Aunque estas evaluaciones han generado resultados aceptables, recientes investigaciones como las de Han et al. (2014) y Hatzigeorgiou y Liolios (2010) cuestionan el uso de un único evento disruptivo para el análisis y proponen cuantificar cómo la edificación se comportará ante sismos posteriores. Dado que un movimiento sísmico es seguido generalmente por múltiples réplicas, se tiene poco tiempo para evaluar o recuperar la estructura dañada. Es así, que un edificio que soportó un sismo puede tener un desempeño específico diferente si es sometido a una réplica en un corto periodo de tiempo.

Las estructuras son más vulnerables a sismos posteriores debido a la reducción en la capacidad de carga lateral causada por el primer sismo (Shokrabadi & Burton, 2018). En Estados Unidos se tienen casos documentados de réplicas que amplificaron el deterioro de edificios ya dañados por los sismos principales, como los ocurridos en Northridge 1994 con una magnitud  $M_w=6.7$

y Kern County 1952 con una magnitud  $M_w=7.3$  (Raghunandan et al. 2014). Además de pérdidas económicas, se producen pérdidas humanas como las de cuatro personas en las réplicas del terremoto de 1997 en Umbria-Marche mientras se encontraban inspeccionando el daño causado por el sismo principal (Gupta y Das 2010).

Las réplicas son respuestas a cambios en esfuerzos generados por sismos grandes en zonas adyacentes a este. Su magnitud así como su disminución temporal tienen una distribución muy variable y son descritas por leyes empíricas como la ley modificada de Omori que modela el decaimiento temporal de la tasa de ocurrencia de réplicas como una función exponencial que disminuye en el tiempo. (Shcherbakov et al. 2013)

En el Perú no se han realizado investigaciones del efecto de réplicas en el desempeño sísmico de edificaciones. Los estudios más recientes han sido desarrollados en otras partes del mundo, por ejemplo Duerr (2010) evaluó el desempeño sísmico de una estructura de concreto armado, que no cumple con los códigos de construcción sísmicos en Canadá, frente a secuencias de sismos y réplicas. Así también estudios como los de Hatzigeorgiou y Liolios (2010), Jeon et al. (2012), Han et al. (2014), Shokrabadi y Burton (2018), entre otros, quienes evidenciaron incrementos en los parámetros de demanda al incorporar réplicas en la evaluación sísmica.

Entender el efecto de las réplicas en la acumulación del daño y el comportamiento previo a la falla de las edificaciones va a permitir mejorar las acciones a tomar para prevenir futuros colapsos de estructuras y mejorar los códigos de construcción. Es así que la presente investigación propone evaluar qué efectos produce incorporar réplicas en la evaluación de desempeño sísmico de edificios de concreto armado en el Perú. Para ello, se ha considerado edificaciones de pórticos resistentes a momento, ya que son las que evidencian mayores daños ante un evento sísmico.

En tal fin se han elegido las configuraciones de edificios educacionales debido a su importancia para la sociedad. Estas edificaciones con los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca. A partir de la información obtenida de estos edificios es posible construir modelos matemáticos que permiten tomar en cuenta sus propiedades de resistencia y no linealidad. Estos modelos pueden ser sometidos a secuencias de sismos y réplicas tomados de bases de datos de Perú y Chile, y ajustados espectralmente para representar el peligro sísmico en Cajamarca.

Mediante un conjunto de análisis dinámicos no lineales es posible obtener las respuestas estructurales de los modelos, luego cuantificarlas en términos de desplazamientos y daño generado, y luego estimar su desempeño.

## **1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

¿Cuál es el efecto de la incorporación de réplicas en la evaluación del desempeño sísmico de los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca?

## **1.3 HIPÓTESIS**

- La incorporación de réplicas en la evaluación de los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca disminuye su desempeño sísmico.

## **1.4 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La incorporación de réplicas en la evaluación del desempeño sísmico de edificios de concreto armado permitirá tener un mejor entendimiento de su comportamiento ante eventos sucesivos. Debido a que durante su vida útil estos no sólo se verán afectados por un único evento, es importante cuantificar qué tanto daño generan las réplicas y cómo afecta su desempeño. De esta manera, es posible tener herramientas para un nuevo enfoque del diseño y la evaluación sísmica hacia procedimientos más cercanos a la realidad.

## **1.5 ALCANCES**

- En la presente investigación se ha estimado el efecto de réplicas en el desempeño sísmico de edificios porticados de concreto armado que cumplen con la normativa peruana. Para tal efecto, solo se considerará la evaluación de dos edificaciones de tipo educacionales en Cajamarca, estos son los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca. El desempeño de otro tipo de edificaciones como edificios altos, hospitales, puentes, estaciones eléctricas, reservorios, viviendas etc., debe ser motivo de otras investigaciones.
- El efecto de la interacción suelo estructura no se ha considerado en esta investigación.
- El efecto de las losas en la capacidad de carga (sección T) de los pórticos no es considerado.
- Se ha considerado el estado de los edificios en condiciones iniciales de funcionamiento, es decir, no se ha tomado en cuenta para la evaluación posibles daños en los elementos estructurales, pues incluirían variables que no son representativas para este estudio.

## **1.6 DELIMITACIÓN**

En esta investigación se ha estimado el desempeño sísmico de dos edificios de tipo educacional en Cajamarca frente a una demanda sísmica incorporando el efecto de réplicas. El método de análisis es dinámico no lineal ya que se usaran registros sísmicos. Dichos registros han sido escalados para representar el peligro sísmico en Cajamarca y luego han sido ensamblados con los registros de réplicas. A partir de estos registros se determinan los desplazamientos de entrepiso, derivas de entrepiso e índice de daño para la edificación evaluada aplicando registros con y sin réplicas.

## **1.7 OBJETIVOS**

### **A. OBJETIVO GENERAL**

- Estimar el efecto de incorporar réplicas en el desempeño sísmico de los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca.

### **B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estimar y comparar los desplazamientos y derivas de entrepiso máximas producidos por sismos únicos e incorporando réplicas en los edificios 2H y 4F.
- Estimar y comparar el índice de daño producido por sismos únicos e incorporando réplicas en los edificios 2H y 4F.

## 1.8 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS

La organización de la presente investigación es la siguiente:

**Capítulo I:** En este capítulo se presenta el contexto y el desarrollo de la formulación del problema de investigación, además se presenta la justificación de la importancia de este estudio, los alcances y los objetivos a conseguir.

**Capítulo II:** En este capítulo se expone el marco teórico de la investigación, este incluye los antecedentes teóricos de investigaciones existentes relacionadas al problema en estudio. Además se presentan las bases teóricas con los fundamentos que sirven de sustento a la investigación y finalmente la definición de términos básicos para un mejor entendimiento del desarrollo del presente estudio.

**Capítulo III:** En este capítulo se describe la ubicación, el tiempo y la época en la que se realizó esta investigación, y también los procedimientos, el tratamiento, el análisis de datos y la presentación de resultados.

**Capítulo IV:** En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos de acuerdo a los objetivos que se plantearon. Se resaltan coincidencias y divergencias con los estudios presentados en los antecedentes teóricos y se brindan explicaciones para cada caso.

**Capítulo V:** En este capítulo se presentan las conclusiones más relevantes derivadas de los resultados obtenidos y se plantean recomendaciones que se han considerado necesarias para ampliar y mejorar futuras investigaciones en relación al tema desarrollado.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 ANTECEDENTES TEÓRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 2.1.1 ÁMBITO INTERNACIONAL

Hatzigeorgiou y Liolios (2010) en su investigación “Comportamiento No lineal de pórticos de concreto armado bajo movimientos sísmicos repetidos” (original en inglés), evaluaron la respuesta inelástica de ocho pórticos de concreto armado detallados de acuerdo al Eurocode 8 frente a cuarenta y cinco registros sísmicos secuenciales. Cinco de ellos tomados de la base de datos del Centro de Investigación de Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER) y cuarenta generados artificialmente. A partir de este estudio se determinó que múltiples sismos incrementan la demanda de desplazamientos de entrepiso en comparación con eventos únicos y también el daño causado.

Del mismo modo, Duerr (2010) en su tesis “Evaluación de vulnerabilidad sísmica y optimización de reforzamiento de edificios no conformes al código con consideración de sismos principales y réplicas” (original en inglés), evaluó el desempeño sísmico de una estructura de concreto armado, que no cumple con los códigos de construcción sísmicos en Canadá, frente a secuencias de sismos y réplicas. Además propuso mecanismos de mejoramiento de la estructura. Su investigación mostró que la máxima deriva de entrepiso se incrementa en 0.15% al evaluar a la edificación frente a secuencias de sismos y réplicas, cambiando su desempeño de “Ocupación Inmediata” a “Seguridad de Vida”.

Jeon et al. (2012) en su investigación “Curvas de fragilidad de réplicas para edificios dañados no dúctiles de concreto armado” (original en inglés) estudiaron el potencial daño sísmico acumulado en edificios no dúctiles de concreto armado incorporando el efecto de múltiples sismos en su desempeño y vulnerabilidad. El modelo experimental del edificio fue desarrollado en OpenSees y el análisis mediante pushover para simular el daño estructural inducido por el sismo principal y luego análisis tiempo historia para simular el daño producido por las réplicas. De esta forma, obtuvieron curvas de fragilidad para réplicas con diferentes estados de daño inicial que evidenciaron que mientras más daño inicial tenga la estructura, la demanda sísmica es mayor por acción de réplicas.

Han et al. (2014) en su investigación “Evaluación del desempeño de edificios con incorporación de réplicas” (original en inglés) evaluaron el desempeño sísmico de edificios de



concreto armado frente a secuencias de sismos y réplicas. Su estudio propone una metodología probabilística para sintetizar réplicas a partir de las características de los eventos principales. Esta toma en cuenta información de las condiciones de sitio del sismo registrado, el tipo de falla, la distancia a la fuente de ruptura y su magnitud. Las conclusiones de su evaluación sísmica evidencian que la metodología propuesta para generar secuencias de réplicas artificiales alcanza resultados estadísticamente similares a los obtenidos empleando registros reales. Y principalmente muestra que incorporar réplicas en la evaluación sísmica genera mayores respuestas estructurales.

Otro enfoque lo realizaron Deka et al. (2014) “Evaluación de daño de estructuras porticadas de concreto armado bajo réplicas de larga duración de movimiento sísmico” (original en inglés) quienes 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.

Por otro lado, Hernández y Bienvenido (2016) en su tesis “Evaluación del efecto de sismos sucesivos sobre la respuesta sísmica de edificios de concreto reforzado” plantearon una metodología para la evaluación del factor de modificación de respuesta, el factor de amplificación de desplazamientos y la deriva máxima de entrepiso considerando el efecto de sismos sucesivos en El Salvador. Sus resultados muestran que el factor de modificación de respuesta disminuye al aumentar el número de registros de la secuencia de eventos.

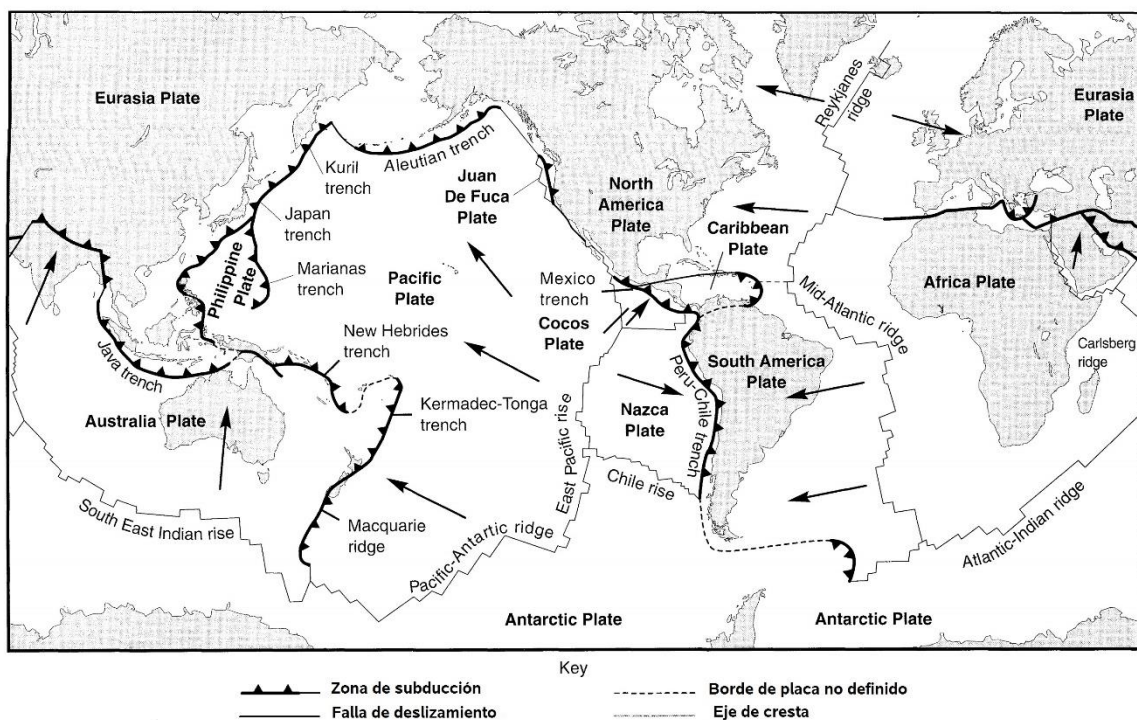
### **2.01.02 ÁMBITO NACIONAL**

En el ámbito nacional no se han realizado investigaciones sobre el efecto de réplicas en el desempeño sísmico de edificios. Las investigaciones realizadas solo alcanzan el uso de eventos únicos, como el estudio de Chacón y Paz (2016) “Análisis de desempeño sísmico de los edificios escolares típicos 780 post 97 de la costa peruana” quienes utilizaron 14 eventos sísmicos aislados para obtener funciones de vulnerabilidad que relacionen diferentes intensidades sísmicas y pérdidas económicas generadas en colegios de la costa peruana.

## 2.2 BASES TEÓRICAS

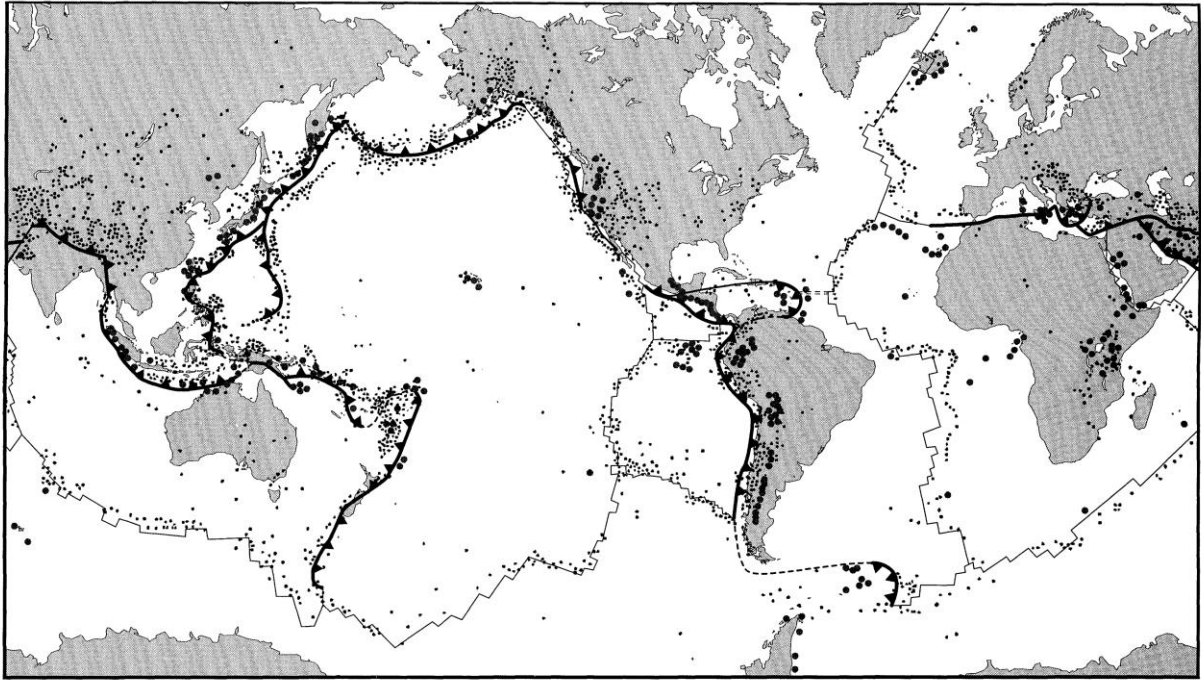
### 2.2.1 TECTONICA MUNDIAL

La hipótesis de la teoría de la tectónica mundial sugiere que la tierra está dividida en bloques litosféricos llamados placas tectónicas que se mueven de forma relativa a otras como resultado de los procesos de convección que ocurren debajo del manto rocoso (Sucuogluo y Akkar 2014). La deformación relativa entre placas ocurre solamente en zonas estrechas cerca a sus bordes, y puede ocurrir en forma lenta y continua (*deformación asísmica*) o puede ocurrir de forma espasmódica con la consecuencia de sismos (*deformación sísmica*) (Kramer, 1996).



**Figura N°01:** Placas tectónicas, naturaleza e interacción de sus bordes (las flechas indican la dirección del movimiento). **Fuente:** Adaptado de Kramer (1996)

De este modo, la actividad sísmica en el planeta puede ser explicado con gran aproximación por el movimiento relativo de las placas tectónicas. Por otro lado, debido a que las deformaciones ocurren en el borde de las placas, la mayoría de los sismos ocurridos en todo el mundo se ubican en estos lugares y se denominan sismos de interplaca. La región más activa de estos sismos es el cinturón del Océano Pacífico donde ocurre un proceso de subducción entre los bloques continentales y oceánicos (Sucuogluo y Akkar 2014).



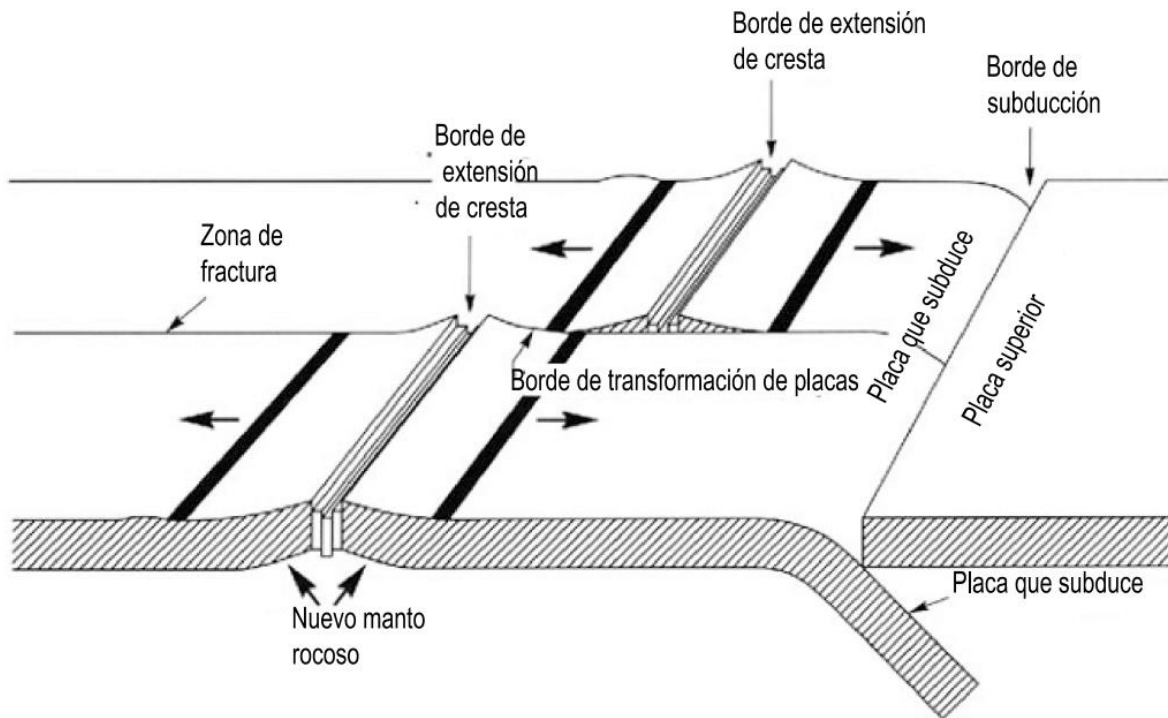
**Figura N°02:** Actividad sísmica en el mundo (los puntos representan los epicentros de los sismos).

**Fuente:** Tomado de Kramer (1996)

### 2.2.1.1 INTERACCIÓN ENTRE BORDES DE PLACAS

Las características de las interacciones entre los bordes de las placas tectónicas define la naturaleza de los sismos producidos. De acuerdo con Kramer 1996 es posible definir tres tipos de mecanismos en bordes de placas tectónicas: bordes de subducción, bordes de extensión de cresta y bordes de transformación de placa.

Los bordes de extensión de cresta son zonas donde las placas se apartan unas respecto a otras, en este proceso la roca fundida debajo del manto rocoso sube hacia la superficie donde se enfria y pasa a formar parte de las placas. Los bordes de transformación de placa o falla ocurren donde las placas se mueven respecto a otras sin crear nueva corteza o consumir corteza vieja, compensando los bordes de extensión de cresta. Finalmente, los bordes de subducción ocurren debido a la creación del material rocoso en los bordes de extensión de placa, que empuja al antiguo material hacia otras placas. Debido a esto, se forma un punto de contacto donde una placa se desliza debajo de la otra.

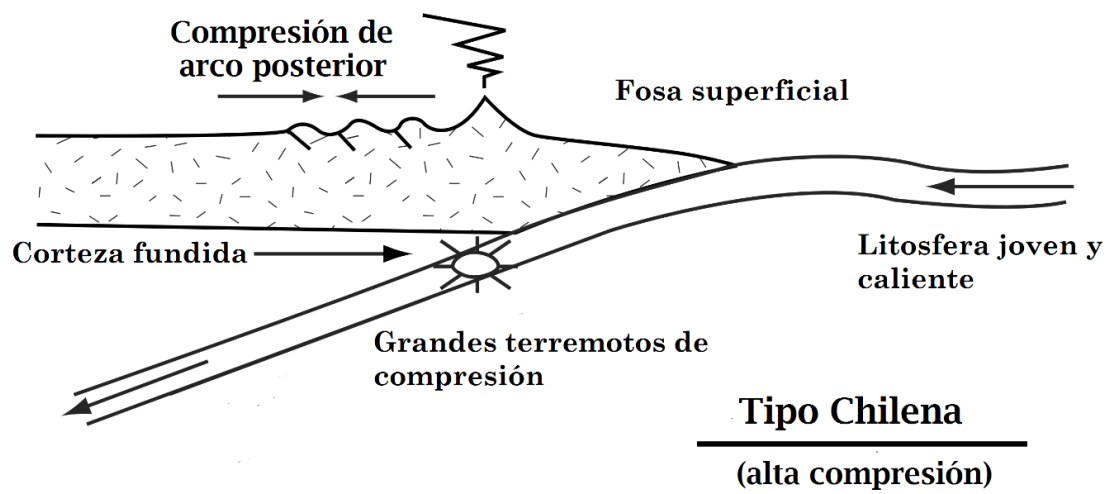


**Figura N°03:** Ilustración de los procesos de interacción de placas: bordes de transformación de placas, bordes de extensión de cresta y bordes de subducción

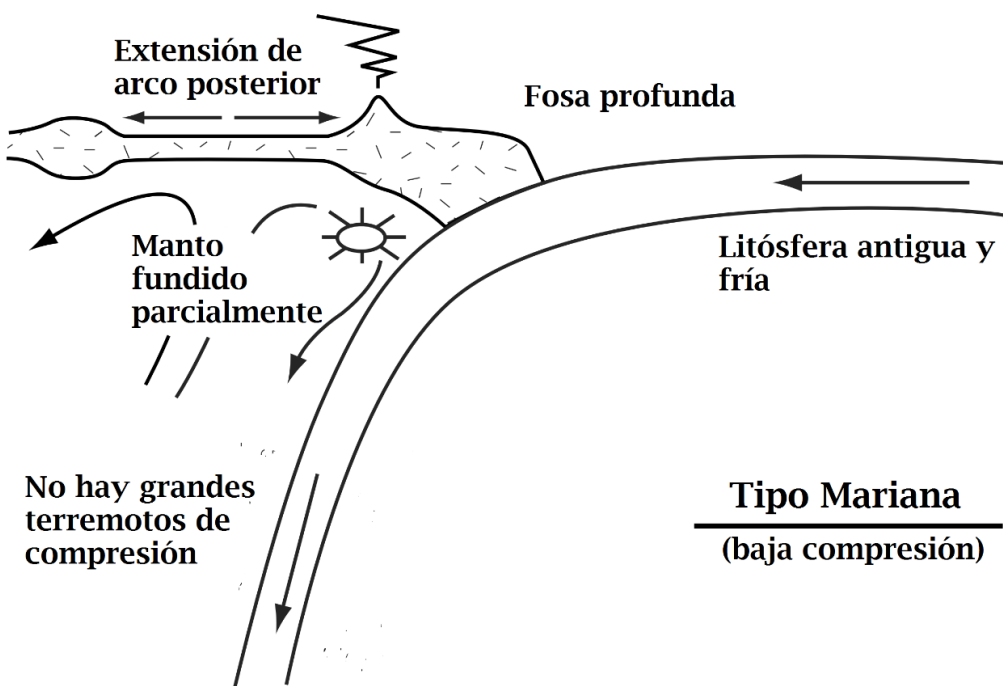
**Fuente:** Adaptado de Sucuoglu y Akkar (2014)

### 2.2.1.2 MECANISMOS DE SUBDUCCIÓN

Las zonas de subducción se diferencian en aquellas que subducen litosfera antigua y las que subducen litósfera nueva. Las primeras suponen zonas de fuerte extensión (poca compresión) con acoplamiento débil entre las dos placas y son denominadas “de tipo Mariana”; y las segundas suponen zonas de fuerte compresión con fuerte acoplamiento entre las dos placas y son denominadas “de tipo Chilena” (Stern 20011).



(a)



(b)

**Figura N°04:** Diagramas que muestran los dos modos de subducción propuestos (a) Alta compresión (Chilena) (b) Baja compresión (Mariana). **Fuente:** Adaptado de Stern (2011)

### **2.2.2 SISMOS TECTÓNICOS**

Un sismo es el movimiento de la tierra, con una duración determinada, como resultado de los procesos tectónicos ocurridos en el interior del planeta. La energía es liberada en forma de ondas que interactúan de forma compleja con litósfera terrestre.

### **2.2.3 RÉPLICAS**

Las réplicas “aftershocks” pueden definirse como sismos secundarios que ocurren después de un sismo más grande “mainshock” y que guardan una relación directa con este último. Aunque la explicación de mecanismos internos es compleja, estas se producen en gran medida por transferencias de esfuerzos y tensiones en zonas adyacentes a los sismos principales. (Diterich, 1972)

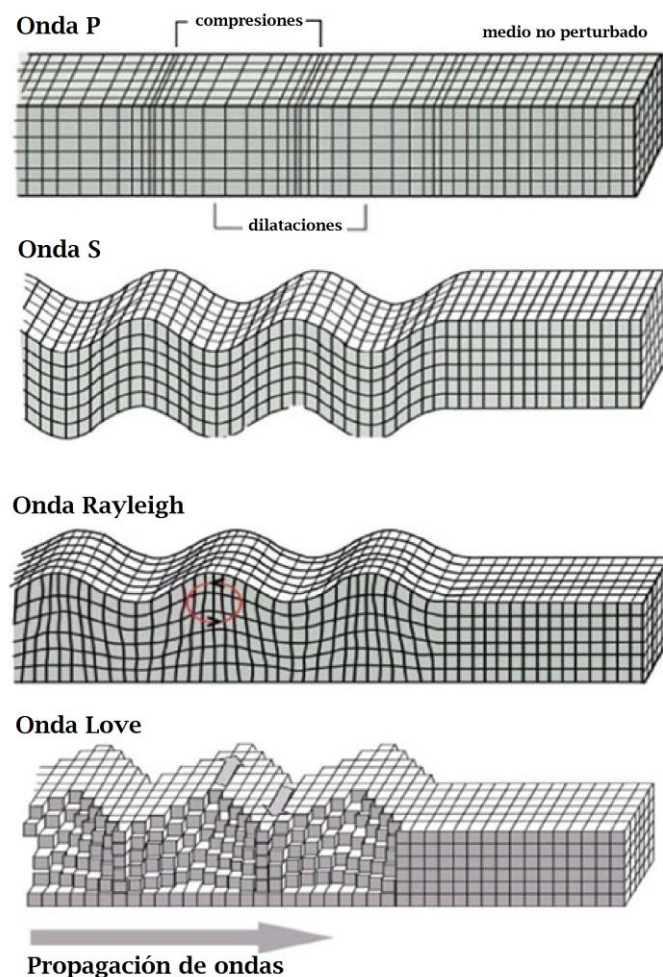
Esto ha sido explorado por Dieterich (1972) quien a través de ensayos de laboratorio sugirió que la ocurrencia de réplicas está relacionada con el incremento en el tiempo de las fuerzas de fricción en rocas y de sus respuestas viscoelásticas. Por otro lado, de acuerdo con Goda et al. (2013) mediante análisis probabilísticos de réplicas es posible obtener un mayor entendimiento respecto a los mecanismos físicos que toman lugar en sus procesos sísmicos. Esto es debido a que la distribución espacial y temporal de las características de las réplicas son una manifestación de la dinámica interna de la corteza.

Su estudio estadístico es posible por medio del entendimiento de sus relaciones con los sismos principales. Aunque haya gran variedad en estas relaciones, se han establecido tres leyes empíricas que caracterizan su ocurrencia. Estas son descritas en el trabajo de Shcherbakov et al. (2013): (a) Ley Gutenberg-Ritcher, que define la distribución de réplicas como una escala invariante en términos de frecuencia, (b) Ley de Bath, establece que la diferencia de magnitud entre un sismo principal y su réplica más grande es aproximadamente constante, y (c) la Ley modificada de Omori que estima el decaimiento temporal de la tasa de ocurrencia de réplicas.

## 2.2.4 ONDAS SÍSMICAS

Cuando ocurre un sismo la energía es liberada a través de ondas, estas pueden ser de dos tipos: ondas de cuerpo (body waves) y ondas de superficie (surface waves).

Las ondas de cuerpo, que viajan a través del interior de la tierra son de dos tipos: ondas-P y ondas-S. Las ondas-P involucran procesos de compresión y rarefacción del material a través del cual pasan y pueden viajar a través de cuerpos sólidos y de fluidos. Las ondas-S producen deformaciones de corte mientras pasan por un material (Kramer 1996). Estas ondas viajan a una velocidad más lenta que las ondas-P.



**Figura N°05:** Deformaciones producidas por ondas de cuerpo, ondas-P y ondas-S; y ondas de superficie, ondas Rayleigh y ondas Love. **Fuente:** Adaptado de Sucuogluo y Akkar (2014)

Las ondas de superficie son el resultado de la interacción entre las ondas de cuerpo y a superficie y las capas superficiales de la tierra. Las ondas de superficie más importantes son

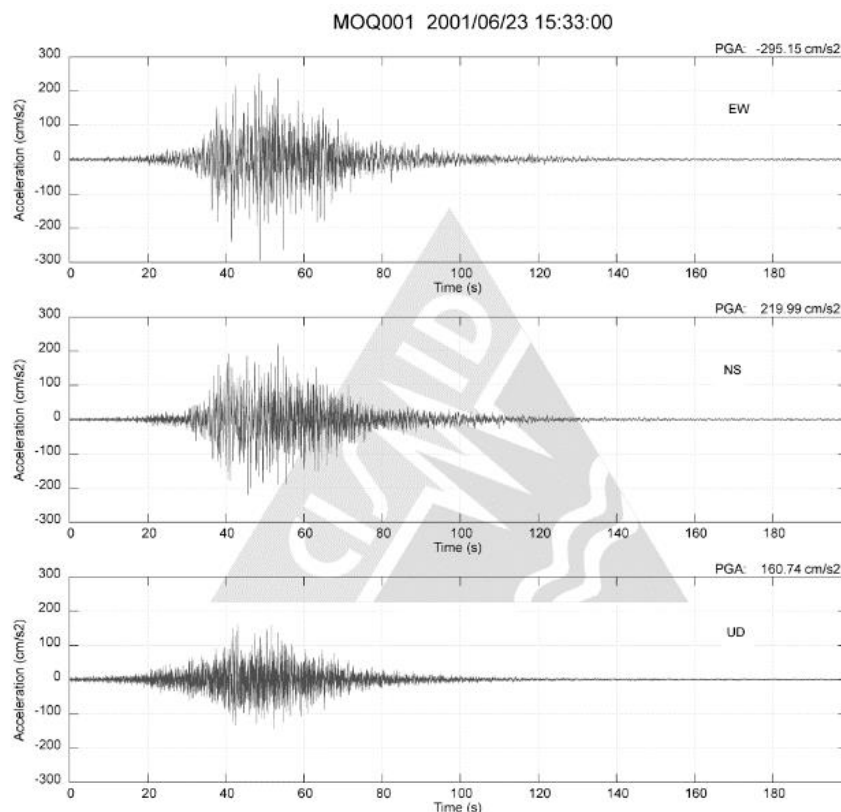
las *ondas Rayleigh* y las *ondas Love*. Las ondas Rayleigh se producen por la interacción de la superficie terrestre con las ondas-P y las componentes verticales de las ondas-S. Las ondas Love son el resultado de la interacción de las componentes horizontales de las ondas-S y una capa superficial suave de la tierra. (Kramer 1996)

## 2.2.5 REGISTROS SÍSMICOS

### 2.2.5.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS

#### A) COMPONENTES

El movimiento del suelo durante un sismo no es en una sola dirección. Más bien ocurre en múltiples direcciones. Los acelerómetros permiten simplificar este comportamiento y registran un sismo en tres componentes de movimiento mutuamente perpendiculares: dirección norte-sur, este-oeste y vertical.



**Figura N°06:** Componente este-oeste (EW), norte-sur(NS) y vertical (UD) de la aceleración de terreno registrada en la estación Cesar Vizcarra Vargas MOQ001 durante el sismo de Arequipa el 23/06/2001.

**Fuente:** Adaptado de Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID)



## **B) PARÁMETROS DE AMPLITUD**

### **B.1 ACELERACIÓN MÁXIMA DEL SUELO**

La aceleración máxima del suelo PGA (peak ground acceleration) es el máximo valor de la aceleración registrada en un acelerograma. En ingeniería sísmica es tomada en su componente horizontal, denominada aceleración máxima horizontal PHA (peak horizontal acceleration). Esta es usualmente usada para describir los movimientos sísmicos debido a su relación con las fuerzas de inercia, pues producen las máximas fuerzas dinámicas en las estructuras (Kramer, 1996) en comparación con la componente de aceleración vertical.

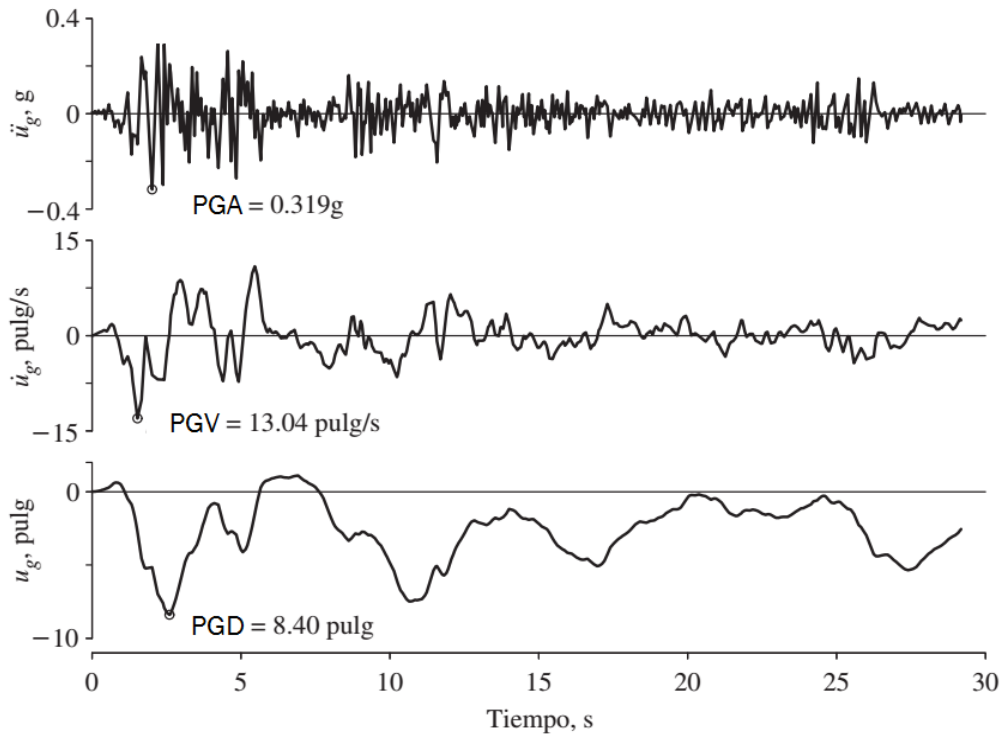
Sin embargo, este parámetro no es completamente representativo de la severidad del sismo debido a que valores aislados de muy alta aceleración no producen daño en periodos de corta duración (Casimiro, 2012). Por otro lado, aunque este puede dar información del tamaño del movimiento, no da mayores características del contenido de frecuencia y su duración.

### **B.2 VELOCIDAD MÁXIMA DEL SUELO**

La velocidad máxima del suelo PGV (peak ground velocity) es la velocidad máxima que registra el movimiento sísmico en la superficie. De igual forma que la aceleración, la componente horizontal PHV (peak horizontal velocity) es el parámetro usado en ingeniería sísmica. Dado que la velocidad es menos sensitiva a los componentes de alta frecuencia del movimiento, la PHV caracteriza de mejor manera su amplitud en frecuencias intermedias (Kramer, 1996).

### **B.3 DESPLAZAMIENTO MÁXIMO DEL SUELO**

El desplazamiento máximo del suelo PGD (peak ground displacement) se asocia a las componentes de baja frecuencia de un movimiento sísmico. Este parámetro es menos usado como medida del sismo debido a que es más difícil de determinar con precisión (Kramer, 1996).

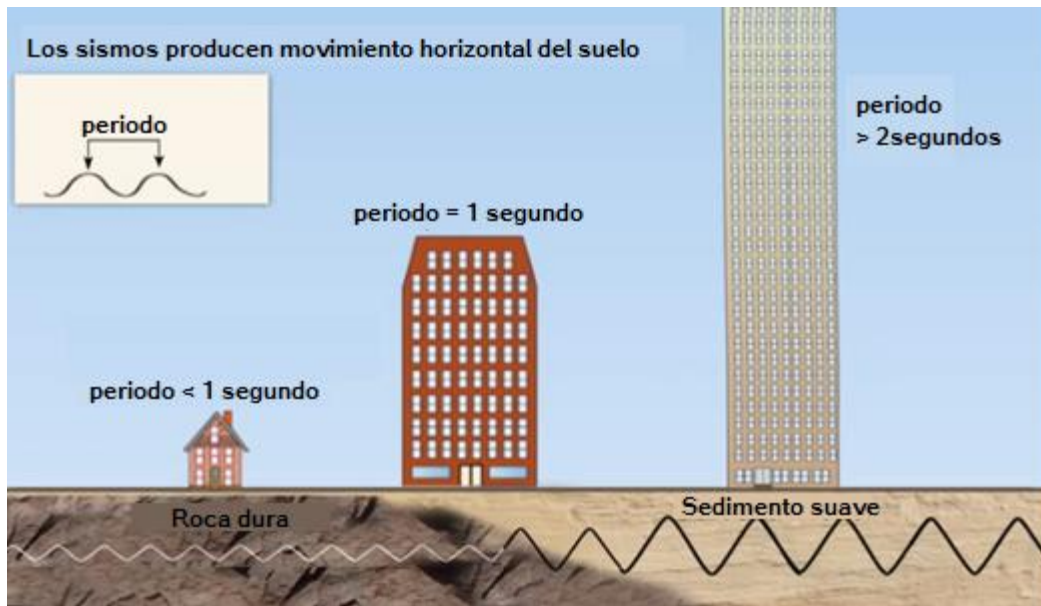


**Figura N°07:** Parámetros de amplitud de la componente norte-sur de la aceleración horizontal del terreno registrada durante del sismo de Valle Imperial de 18/05/1940.

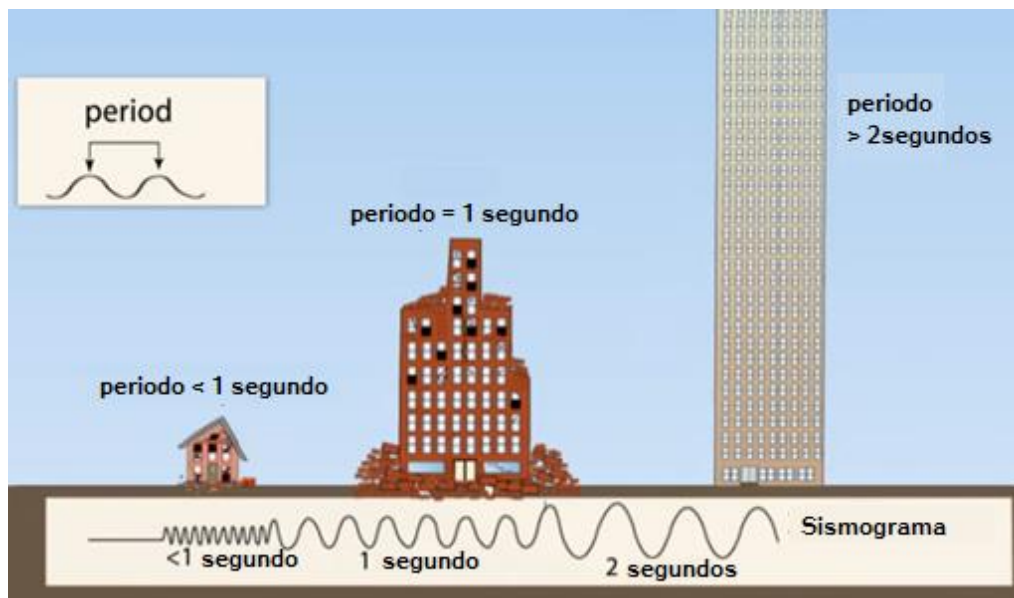
**Fuente:** Adaptado de Chopra (2014)

### C) PARÁMETROS DE CONTENIDO DE FRECUENCIA

Los sismos producen cargas complejas con componentes de movimiento que abarcan un extenso rango de frecuencias. El contenido de frecuencia describe la forma en la que la amplitud del movimiento sísmico se distribuye entre las diferentes frecuencias (Kramer, 1996). El movimiento sísmico en una estructura se amplifica al máximo cuando el contenido de frecuencia del movimiento y la frecuencia natural de esta son similares debido al fenómeno de resonancia.



(a)



(b)

**Figura N°08:** Influencia del contenido de frecuencia del sismo y el periodo de vibración de la estructura.

**Fuente:** Adaptado de Incorporated Research Institutions for Seismology IRIS (2015)

De esta forma, el sedimento rocoso supone alta frecuencia (periodo < 1s) y pequeñas amplitudes, que son resonantes con un edificio pequeño que tiene periodo de vibración menor a 1 segundo. Una combinación de sedimento rocoso y sedimento suave conduce a frecuencias de vibración resonantes con edificios de periodos de 1 segundo. Finalmente, el sedimento suave

produce a bajas frecuencias de vibración (periodo > 2s) que son resonantes con edificios altos que tienen periodos de vibración mayores a 1s.

#### **D) PARAMETROS DE DURACIÓN**

El tiempo que dura un registro sísmico está relacionado con el tiempo necesario para la liberación de la energía de deformación acumulada en la zona de ruptura, por lo que si el área o la longitud de la falla incrementa, el tiempo de duración también. Debido a ello, la duración del sismo se incrementaría con su magnitud (Kramer, 1996).

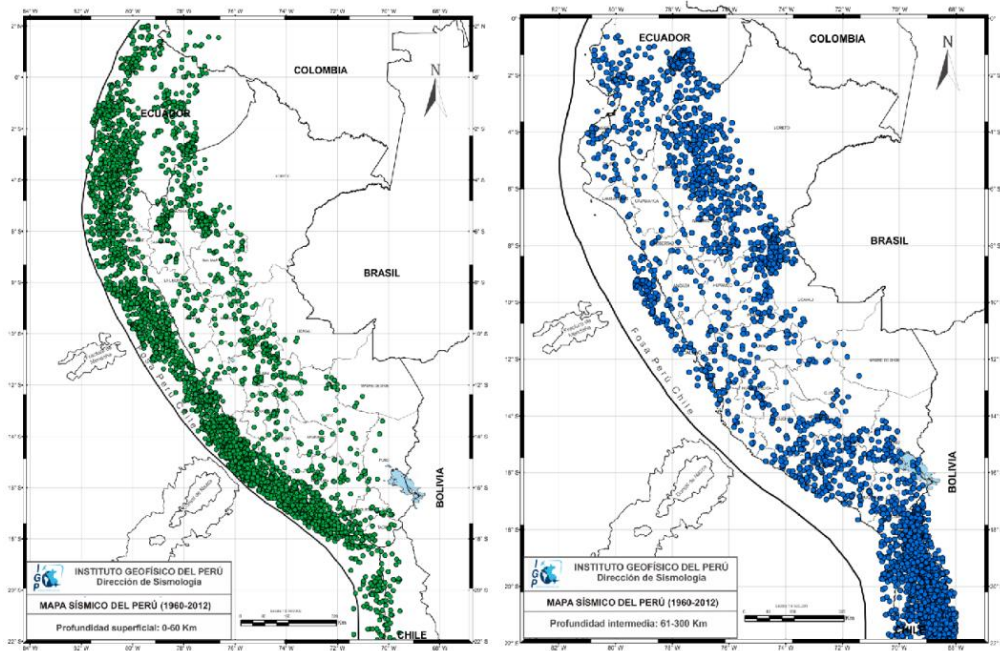
Por otro lado, la duración de un movimiento sísmico tiene gran influencia en el nivel de daño producido. Esto se debe en gran medida a los procesos físicos como degradación de rigidez y resistencia de ciertas estructuras son sensibles al número de inversiones de carga o esfuerzo que ocurren durante un sismo (Kramer, 1996).

### **2.2.6 SISMICIDAD EN PERÚ**

#### **2.2.6.1 CONDICIONES SÍSMICAS EN LA REGIÓN, FUENTES DE SISMOS, SISMICIDAD HISTÓRICA**

La sismicidad en el Perú es compleja, Alva y Castillo (1994) agrupan las causas de los eventos sísmicos en el Perú en dos fuentes, subducción y continentales. Las fuentes de subducción modelan la interacción de las placas Sudamericana y Nazca; y las fuentes continentales relacionadas a la actividad sísmica superficial. Es decir, la sismicidad en el territorio peruano se debe en gran medida al proceso de subducción de placas y también a la dinámica de cada una de las unidades tectónicas presentes en el interior del continente (Bernal et al. 2014)

Estas fuentes simogénicas en el Perú definen la existencia de por lo menos cuatro tipos de eventos sísmicos: sismos de intraplaca oceánica, sismos de interplaca, sismos corticales y sismos de intraplaca de profundidad media y profunda. La información sobre sismicidad histórica (sismos ocurridos a lo largo de la historia del Perú) es presentada en el trabajo de Bernal et al. (2014) en la cual desarrollan una re-evaluación del peligro sísmico en el país. De acuerdo a este estudio, los terremotos de mayor magnitud que se han producido son el de 1586 (magnitud 8.1), 1687 (magnitud 8.2) y 1746 (magnitud 8.4). La siguiente figura muestra la distribución espacial de la sismicidad histórica en nuestro país.



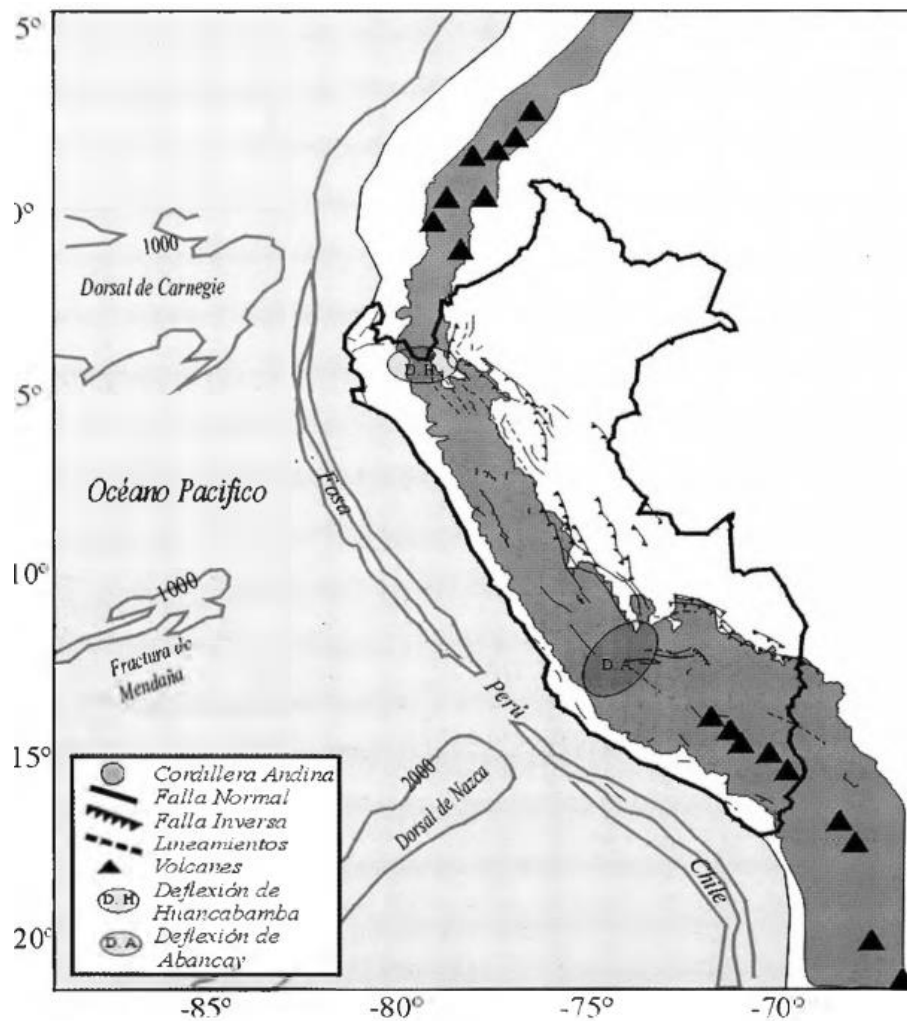
**Figura N°09:** Sismicidad histórica en el Perú (1960-2012) sismos de profundidad superficial y sismos de profundidad intermedia.

**Fuente:** Tomado de Bernal et al. (2014)

### 2.2.6.2 SUBDUCCIÓN DE PLACA DE NAZCA

El proceso de subducción de la placa de Nazca (oceánica) constituye una de las fuentes sismogénicas más importantes en el mundo debido a que converge con la placa Sudamericana (continental) a una velocidad de 8 cm/año (Tavera y Bernal, 2005).

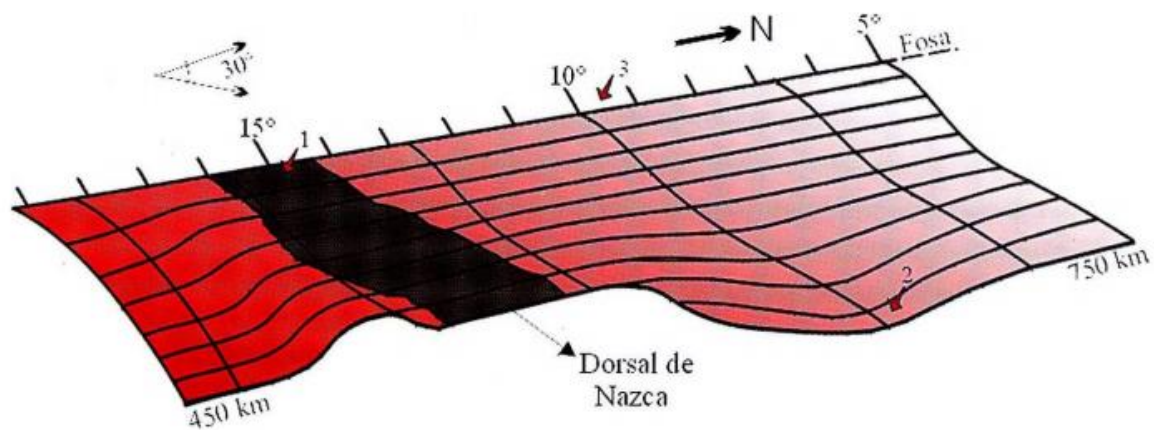
Este proceso se realiza acompañado elementos tectónicos que controlan toda la geodinámica del borde Oeste de Sudamérica. Estos elementos se muestran en la Figura N°10 y son la Dorsal de Nazca, la Fractura de Mendaña, la Fosa Peruano-Chilena, la Cordillera Andina, la Cadena Volcánica y los diferentes sistemas de Fallas distribuidas en el interior del continente ( Tavera y Bernal, 2005).



**Figura N°10:** Principales elementos tectónicos superficiales presentes en el borde oeste de Perú

**Fuente:** Tomado de Tavera y Bernal (2005)

Bufo y Tavera (2001) estudiaron las fuentes de mecanismos sísmicos en el Perú a partir del estudio de 19 sismos ocurridos en el país entre 1990 y 1996, el esquema de la figura n°11 muestra el proceso de subducción resultado de su estudio. En este se identifican dos tipos de mecanismos de subducción: subducción plana en el norte y centro, y subducción normal en el sur del Perú. En la subducción plana, la placa subduce de norte a sur con un ángulo medio de 30° hasta una profundidad de orden de 100 a 120 km a partir de la cual en la región Norte y Centro continúa de forma horizontal hasta distancias de aproximadamente 700 km desde la línea de la fosa. Por otro lado, en la región sur, el ángulo de inclinación de la placa es continuo hasta una profundidad de 300km. (Tavera y Bernal, 2005)

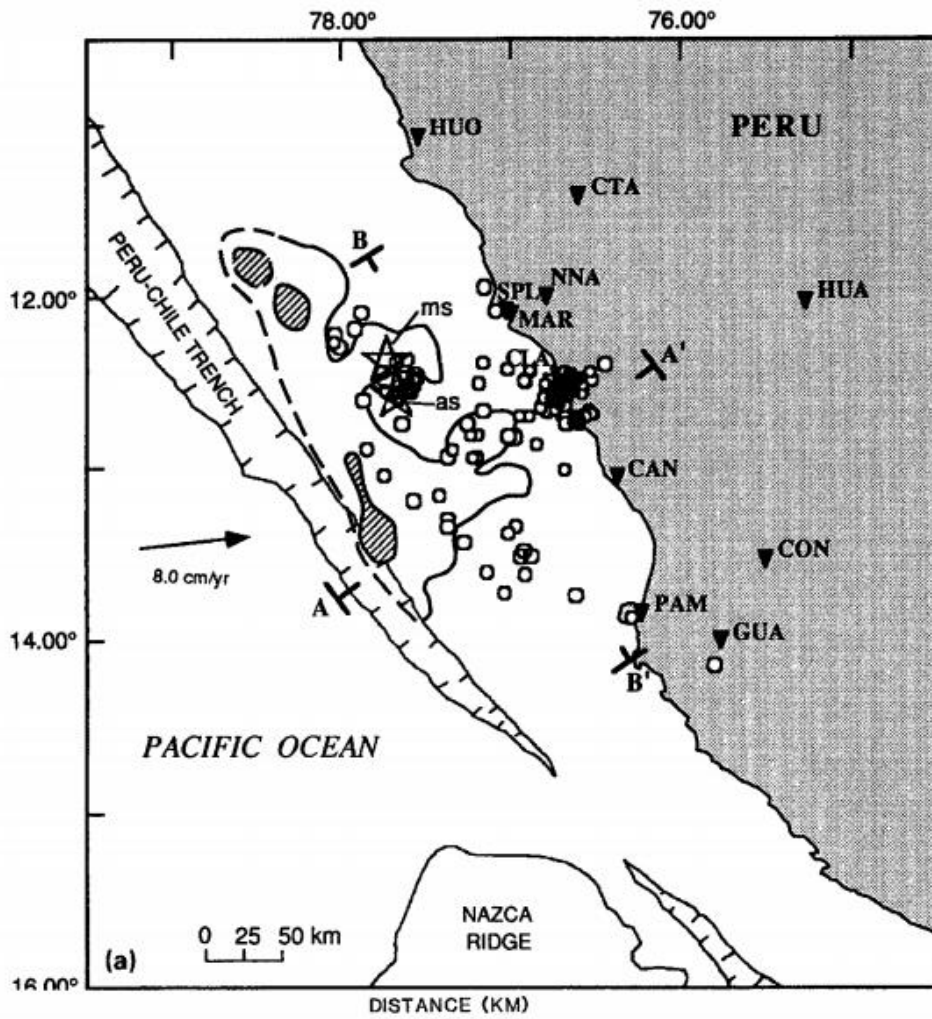


**Figura N°11:** Esquema 3D del proceso de subducción frente al borde oeste del Perú, los números 1 y 3 indican las áreas de mayor deformación debido a la mayor ocurrencia de sismos.

**Fuente:** Tomado de Tavera y Bernal, 2005

### 2.2.6.3 SISMOS Y RÉPLICAS EN EL PERÚ

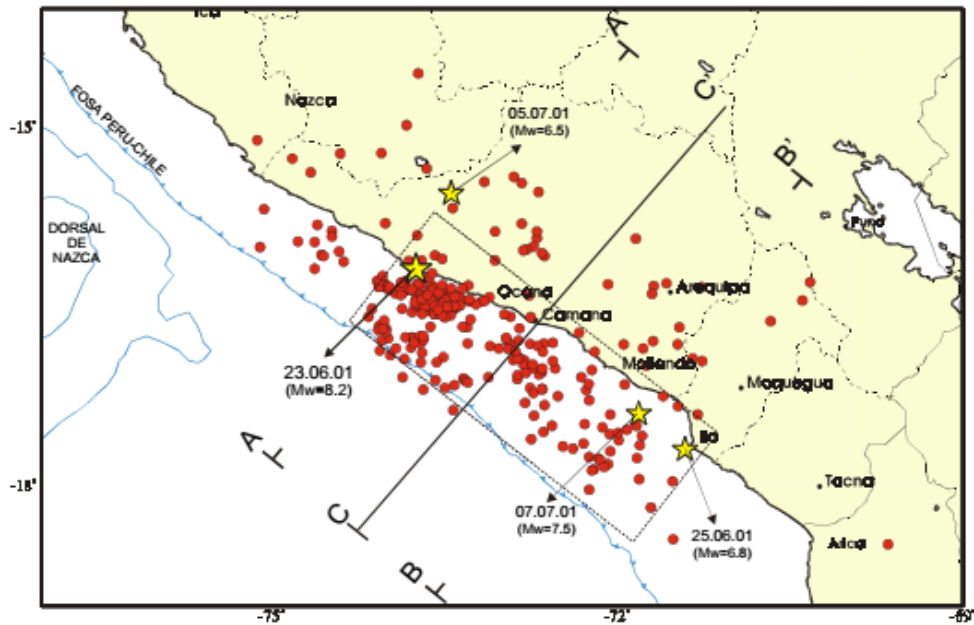
En el Perú grandes sismos han generado la ocurrencia de réplicas considerables, como el sismo del 24 de mayo de 1940 ( $M=8$ ) con múltiples réplicas la mayor ocurrida el mismo día ( $M=7$ ) (Ruff y Beck, 1989); el sismo del 03 de octubre de 1974 ( $M_w=8.1$ ) con múltiples réplicas, la mayor el 09 de noviembre ( $M_s=7.1$ ) (Spence y Langer 1995); el sismo del 23 de junio del 2001 (figura n°13) ( $M_w=8.4$ ) que fue seguido por múltiples réplicas como el 26 de junio ( $M_w=6.7$ ) y el 7 de julio ( $M_w=7.5$ ) (Bilek y Ruff 2002); y el sismo del 15 de agosto del 2007 ( $M_w=7.9$ ) seguido por un total de 355 réplicas (figura N°14) con magnitud mayor o igual a  $M_l=3.0$  (Alarcón, Taucer y So, 2008).



**Figura N°12:** Distribución espacial de las 127 réplicas del terremoto del 03 de Octubre de 1974. La estrella más superior representa el sismo principal y la otra la réplica principal del 09 de noviembre del mismo año. Los círculos representan las réplicas de acuerdo a su tamaño.

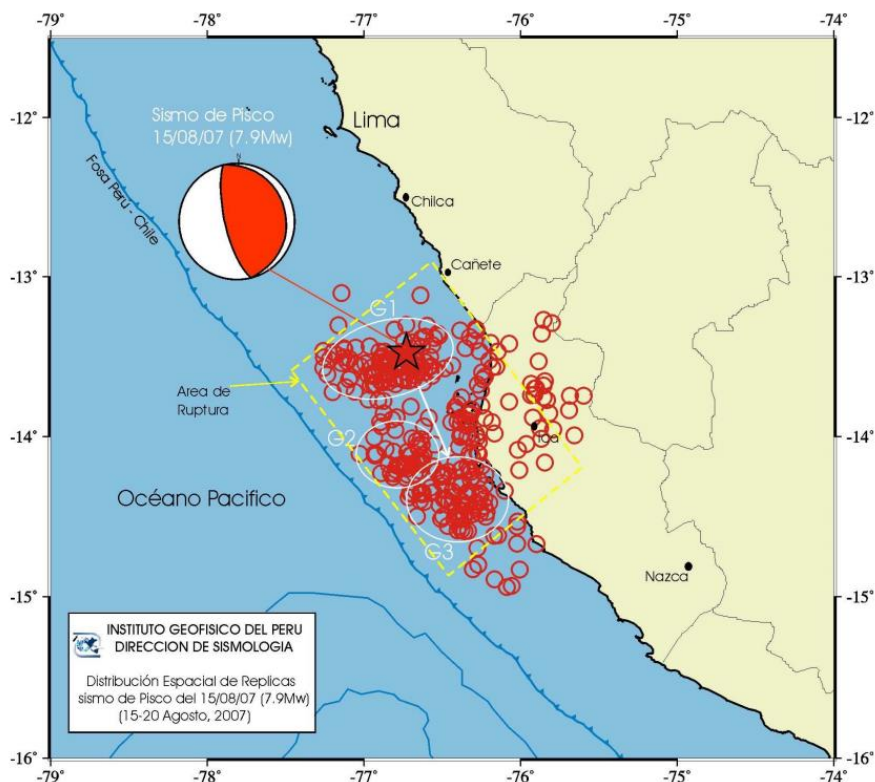
**Fuente:** Tomado de Langer y Spence (1995)





**Figura N°13:** Distribución espacial de las réplicas del terremoto de Arequipa 06/06/2001 ocurridas entre 28 de junio y 19 de julio. Las estrellas representan el epicentro del terremoto principal y las tres réplicas de mayor magnitud.

**Fuente:** Antayhua et al. (2002)



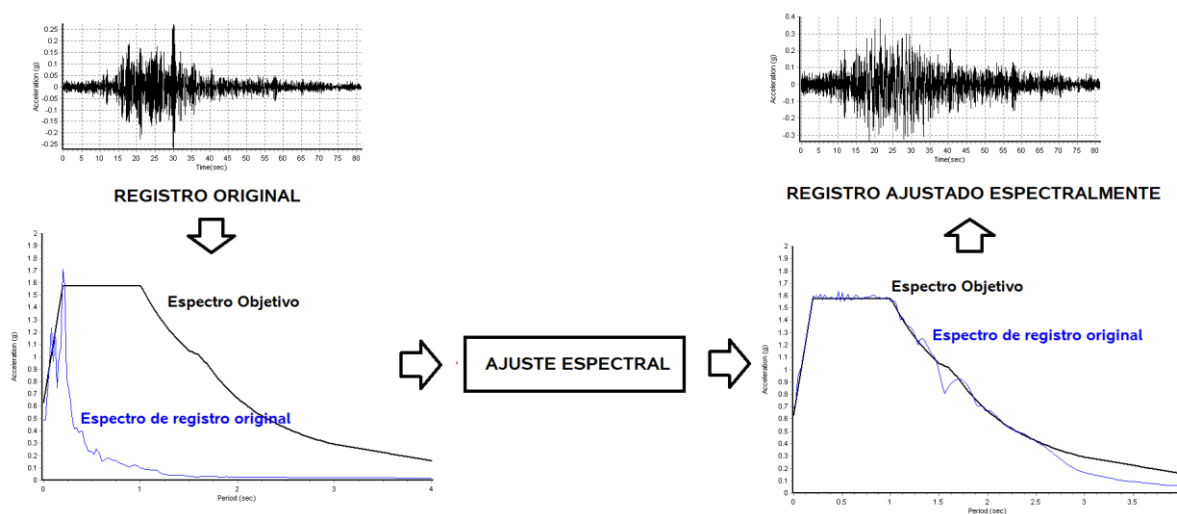
**Figura N°14:** Distribución espacial de las réplicas, asociadas en tres grupos, del sismo de Pisco ocurridas entre los días 15 al 21 de agosto de 2007.

**Fuente:** Tomado de Tavera et al. (2007)

## 2.2.7 AJUSTE ESPECTRAL DE REGISTROS SÍSMICOS

Es un proceso que mediante la modificación del contenido de frecuencia de un registro sísmico “ajusta” su espectro de respuesta a un espectro objetivo en todos los periodos espectrales. Es decir, permite escalar el registro sísmico que se tiene para representar un nivel de peligro sísmico determinado. Mediante este método es posible 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. Por otro lado, permite tener menores restricciones en la selección del registro de aceleración inicial ya que el ajuste espectral corrige las diferencias en el contenido de la frecuencia en diferentes tipos de condiciones del sitio (Abrahamson y Atik 2010).

Este procedimiento está indicado como un método para generar registros sísmicos compatibles con el peligro sísmico del área de estudio en ASCE 41-17 “Evaluación Sísmica y Reforzamiento de Edificios Existentes” y ASCE 7-16 “Cargas de diseño mínimas y criterios asociados para edificios y otras estructuras”. En la normativa peruana este procedimiento no se encuentra indicado.



**Figura N°15:** Proceso de ajuste espectral de acelerogramas o registros sísmicos

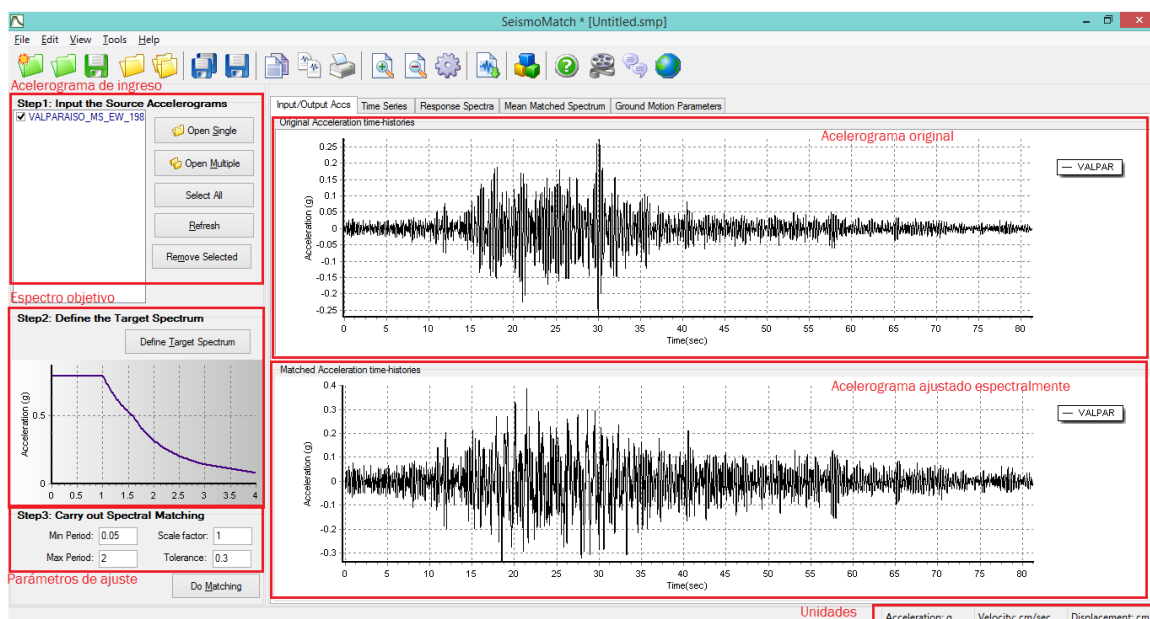
Existen tres metodologías básicas para el ajuste espectral estas son: el método con dominio en la frecuencia, método con dominio en la frecuencia y teoría vibración aleatorio, y método con dominio en el tiempo (Abrahamson y Atik 2010). Para esta investigación se empleará el método de ajuste espectral con fragmentos de onda en el dominio del tiempo implementado en el software Seismomatch.

### 2.2.7.1 CONSIDERACIONES PARA EL AJUSTE ESPECTRAL

El escalamiento de los registros sísmicos por medio de ajuste espectral debe tomar en cuenta las consideraciones indicadas en el Estándar ASCE-41. Se indica que los espectros se escalen de tal forma que en el rango de periodos entre  $0.2T$  y  $1.5T$  ( $T$ , periodo fundamental) el promedio de los valores espectrales obtenidos para los distintos juegos de registros no sea menor que la ordenada correspondiente al espectro de diseño inelástico. Esta condición será verificada en los procesos de ajuste espectral de los siete registros sísmicos considerados en este estudio.

### 2.2.7.2 SOFTWARE SEISMOMATCH

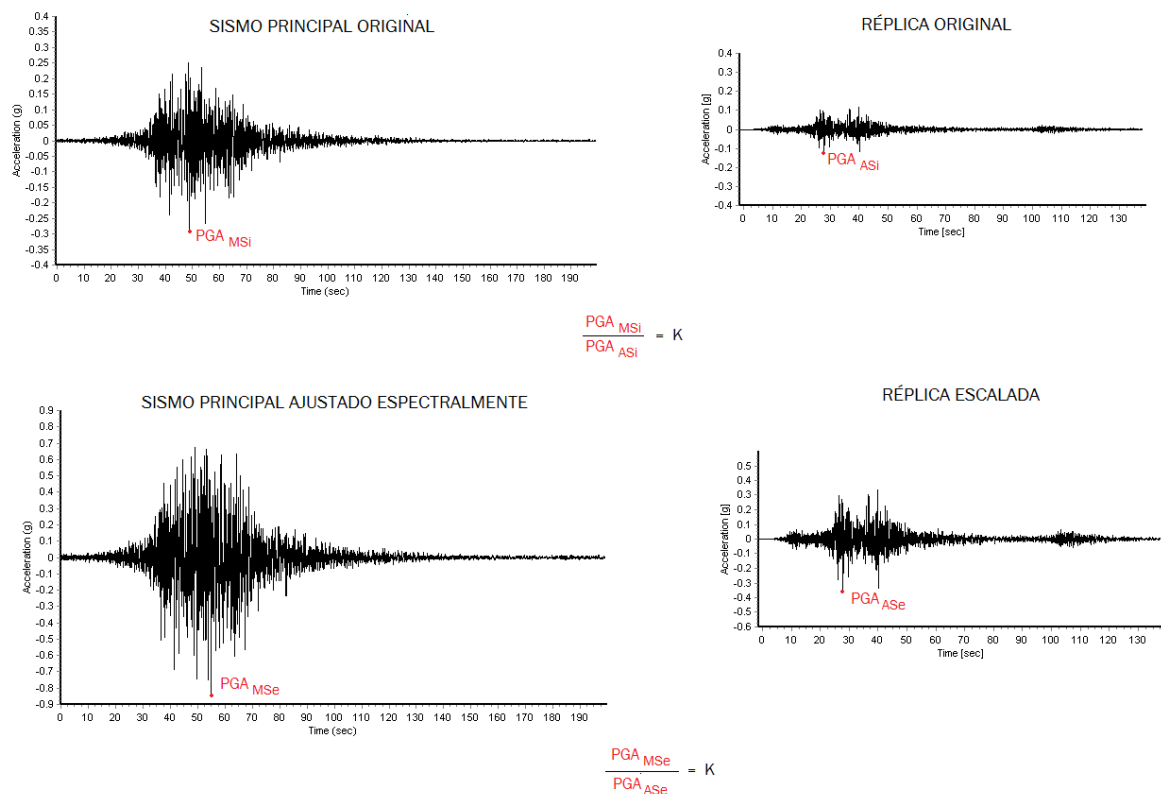
Seismomatch es un software capaz de ajustar el contenido espectral de registros sísmicos hacia un espectro de respuesta (espectro objetivo), mediante el algoritmo de fragmentos de onda propuesto por Hancock et al. (2006) o el algoritmo propuesto por Atik y Abrahamson (2010). Además permite a los usuarios ajustar espectralmente diferentes acelerogramas, y luego obtener un espectro promedio ajustado con una variación máxima respecto a una tolerancia predefinida (Seismosoft 2019). El procedimiento de uso del software consiste en cargar los registros sísmicos en estudio, definir el espectro objetivo, seleccionar el algoritmo de ajuste, definir los parámetros de ajuste, definir el periodo de ajuste y luego ejecutar el ajuste espectral (Seismosoft 2019).



**Figura N°16:** Interfaz de SeismoMatch. Se observa las entradas de acelerogramas, definición de espectro objetivo y las salidas (acelerograma original y ajustado espectralmente)

### 2.2.7.3 ESCALAMIENTO DE RÉPLICAS

Para poder construir las secuencias de sismos y réplicas, es necesario escalar las réplicas respecto a sus eventos principales (ajustados espectralmente) de tal forma que se mantenga la proporción que existe entre ellos, lo que supondría mantener la relación original en los mecanismos de ruptura de ambos procesos. En ese sentido, se ha considerado tomar el parámetro PGA y mantener la relación presente en los valores originales de ambos registros. El siguiente gráfico muestra el proceso que se ha seguido.



**Figura N°17:** Proceso de escalamiento de réplicas con respecto al sismo principal, se mantienen las relaciones entre PGA en cada caso

Donde:

$PGA_{MSI}$ : Aceleración pico máxima del registro del sismo principal original

$PGA_{ASI}$ : Aceleración pico máxima del registro de la réplica original

$PGA_{MSe}$ : Aceleración pico máxima del registro del sismo principal ajustado espectralmente

$PGA_{ASe}$ : Aceleración pico máxima del registro de la réplica escalada

$K$ : constante

Por tanto:

$$\frac{PGA_{MSi}}{PGA_{ASi}} = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{ASe}} \quad (1)$$

Entonces:

$$\frac{PGA_{MSi}}{PGA_{ASi}} = \frac{PGA_{MSe}}{a_{ASe}} \quad (2)$$

Donde:

$a_{ASe}$ : Aceleración del registro de la réplica escalada

Luego:

$$a_{ASe} = \frac{PGA_{ASi}}{PGA_{MSi}} * PGA_{MSe} \quad (3)$$

$$a_{ASe} = a_{MSe} * F \quad (4)$$

Despejando:

$$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}} \quad (5)$$

Donde:

$F$ : factor de escala de la réplica tomada

#### 2.2.7.4 ESPECTROS OBJETIVO

Ejecutar la metodología de ajuste espectral con dominio en el tiempo supone fijar espectros “objetivo” en base a los cuales serán escalados los registros sísmicos. Para su construcción, el primer paso es la determinación del peligro sísmico, es decir, la magnitud de los sismos esperados para diferentes periodos de retorno en el área de estudio.

Actualmente, los códigos sísmicos de todos los países parten de un estudio de esta naturaleza. En el Perú, la norma E.030 Diseño Sismoresistente sigue una metodología para la construcción de un espectro de respuesta de pseudoaceleraciones con un periodo de retorno de 475 años que

toma en cuenta el peligro sísmico en todo el territorio peruano. Esta metodología será tomada como base para la construcción de los espectros “objetivo” que representen el peligro sísmico en el área de estudio.

### A) NIVELES DE PELIGRO SÍSMICO

Para la construcción de espectros que representen diferentes niveles de peligro sísmico (distintos periodos de retorno) es posible seguir metodologías específicas. En este estudio se usará la propuesta de Aguiar (2004), que presenta cuatro eventos sísmicos recomendados por el comité VISION 2000, para la evaluación del desempeño sísmico de edificaciones. Estos cuatro eventos que propone se justifican en la necesidad de conocer no solo el comportamiento estructural frente sismos grandes, sino también frente a sismos menores y más recurrentes que podrían también producir pérdidas considerables.

**Tabla 01:** Sismos recomendados para la construcción de espectros de peligro sísmico

Sismo	Vida Útil T	Probabilidad de Excedencia P*	Período medio de Retorno, $t_r$	Tasa Anual de excedencia, $p_1$
<b>Frecuente</b>	30 años	50%	43 años	0.02310
<b>Ocasional</b>	50 años	50%	72 años	0.01386
<b>Raro</b>	50 años	10%	475 años	0.00211
<b>Muy raro</b>	100 años	10%	970 años	0.00105

**Fuente:** Tomado de Aguiar (2004).

### B) CONSTRUCCIÓN DE FORMAS ESPECTRALES (ESPECTROS OBJETIVO)

De acuerdo a lo visto en el apartado anterior los espectros de respuesta para cada nivel de peligro sísmico se han construido para cuatro tipos de sismos asociados cada uno a un periodo de retorno específico. Para su construcción se ha considerado la *propuesta de formas espectrales* desarrollado por Aguiar (2004).

El **Sismo Frecuente** se obtiene del mismo espectro elástico de la Norma E.030 pero con un valor de aceleración de sismo raro dividido entre 3, tomando un factor de amortiguamiento  $\zeta$  de 2%. Para el cálculo se han empleado las ecuaciones de Newmark y Hall (Aguiar, 2004).

$$a_2 = a_1 * \frac{(3.21-0.68*Ln(\varepsilon_2))}{(3.21-0.68*Ln(\varepsilon_1))} \quad (6)$$

Donde:

$a_2$ : aceleración correspondiente al factor de amortiguamiento  $\varepsilon_2$

$a_1$ : aceleración correspondiente al factor de amortiguamiento  $\varepsilon_1$

$0 < \varepsilon_1 < 100\%$

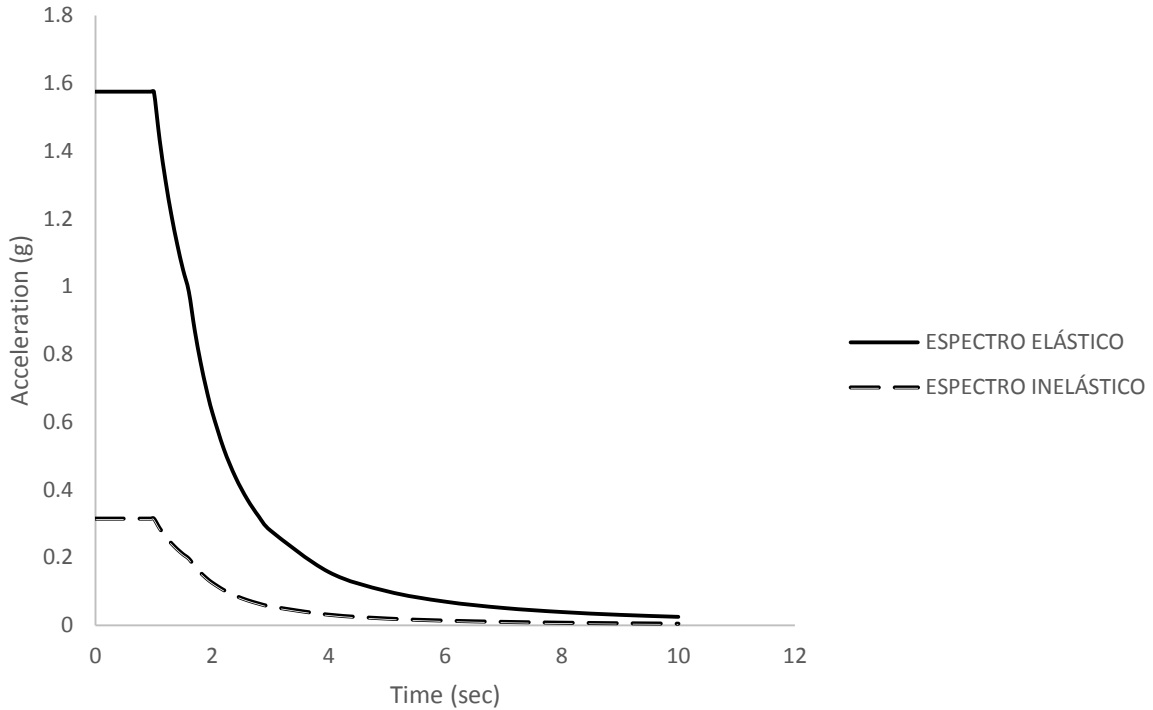
$0 < \varepsilon_2 < 100\%$

Para el **Sismo Ocasional** es adecuado utilizar la recomendación de Guendelman que consiste en multiplicar el espectro de sismo frecuente por 1.4. Para el **Sismo Raro** de acuerdo con Aguiar (2004) se emplea el espectro elástico calculado a partir de la normativa correspondiente, en este caso la Norma E.030. Por último, para el **Sismo Muy Raro** se propone multiplicar el espectro elástico por 1.30, debido a que haciendo esto la probabilidad de excedencia se reduce al 5% en un tiempo de 100 años, esto para una valor de aceleración de 0.40g pero como se esperan sismos más fuertes la probabilidad de excedencia va a subir al orden de 10%. Por otro lado, un valor mayor a 1.30 implicaría la reducción de la probabilidad de excedencia y un incremento del periodo medio de retorno (Aguiar, 2004).

### **B.1 Espectro de respuesta según Norma E.030**

La norma E.030 Diseño Sismoresistente propone un espectro inelástico de pseudoaceleraciones para el diseño estructural mediante el método de análisis modal espectral. Este espectro caracteriza el peligro sísmico en el área de estudio a partir de parámetros de sitio, importancia de la edificación, sistema estructural y aceleración horizontal máxima esperada en un periodo de retorno de 475 años (sismo raro).

De esta forma, se permite suponer la incursión de las edificaciones en el rango inelástico tomando en cuenta la baja probabilidad de ocurrencia de un sismo raro. Esto se hace reduciendo el espectro elástico por un factor de reducción de respuesta asociado principalmente a la capacidad de disipación de energía (ductilidad) de los diferentes sistemas estructurales.



**Figura N°18:** Espectros elástico e inelástico (reducido)

El espectro inelástico de pseudoaceleraciones queda definido por:

$$Sa = \frac{Z*U*C*S}{R}g \quad (7)$$

Donde:

*Sa*: aceleración espectral

*Z*: factor de zona

*U*: factor de uso

*C*: factor de amplificación sísmica

*S*: factor de suelo

*R*: factor de reducción de respuesta

## A.2 Cálculo del espectro elástico de respuesta según Norma E.030 (Sismo Raro)

La obtención del espectro elástico de pseudoaceleraciones para un **sismo raro** se ha realizado de acuerdo a los parámetros de la norma E.030 obviando el factor de reducción de respuesta.

$$Sa/g = Z * U * C * S \quad (8)$$

Donde:

*Sa*: aceleración espectral



Z: factor de zona

U: factor de uso

C: factor de amplificación sísmica

S: factor de suelo

### a. Factor de Zona Z

Es un factor definido de acuerdo a la distribución espacial de la sismicidad observada, las características generales de los movimientos sísmicos y la atenuación de estos con la distancia epicentral. Se interpreta como la aceleración máxima horizontal (como fracción de la aceleración de la gravedad) en suelo rígido con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años.

**Tabla N°02:** Factores de Zona “Z”

ZONA	Z
4	0,45
3	0,35
2	0,25
1	0,10

**Fuente:** Tomado de: R.N.E. Norma E.030 Diseño Sismoresistente

### b. Factor de Uso U

Este factor toma en cuenta el nivel de riesgo en el diseño, es mayor a 1 si el daño estructural es menos tolerable frente a las acciones sísmicas. Se encuentra definido por la siguiente tabla:

**Tabla N°03:** Categoría de las Edificaciones

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

**Fuente:** Tomado de: R.N.E. Norma E.030 Diseño Sismoresistente

**c. Factor de amplificación sísmica C**

El factor de amplificación sísmica es definido por las siguientes expresiones de acuerdo los parámetros de sitio.

$$T < T_p \quad C = 2.5$$

$$T_p < T < T_L \quad C = 2.5 * \frac{T_p}{T}$$

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

Donde T es el periodo fundamental de vibración del sistema. Este coeficiente se interpreta como el factor de amplificación de la aceleración estructural respecto a la aceleración del suelo.

#### d. Factor de Suelo S

El factor de suelo define las condiciones geotécnicas del sitio de estudio. La norma E.30 establece cuatro tipos de suelo de acuerdo a la velocidad promedio de propagación de ondas de corte  $\bar{V}_s$ , el promedio ponderado de los  $\bar{N}_{60}$  para suelos granulares o el promedio ponderado de la resistencia al corte en condición no drenada  $\bar{S}_u$  para suelos cohesivos.

**Tabla N°04:** Clasificación de los Perfiles de Suelo

Perfil	$\bar{V}_s$	$\bar{N}_{60}$	$\bar{S}_u$
S <sub>0</sub>	> 1500 m/s	-	-
S <sub>1</sub>	500 m/s a 1500 m/s	> 50	>100 kPa
S <sub>2</sub>	180 m/s a 500 m/s	15 a 50	50 kPa a 100 kPa
S <sub>3</sub>	< 180 m/s	< 15	25 kPa a 50 kPa
S <sub>4</sub>	Clasificación basada en el EMS		

**Fuente:** Tomado de: R.N.E. Norma E.030 Diseño Sismoresistente

**Tabla N°05:** Factor d Suelo “S”

SUELO ZONA	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
Z <sub>4</sub>	0,80	1,00	1,05	1,10
Z <sub>3</sub>	0,80	1,00	1,15	1,20
Z <sub>2</sub>	0,80	1,00	1,20	1,40
Z <sub>1</sub>	0,80	1,00	1,60	2,00

**Fuente:** Tomado de: R.N.E. Norma E.030 Diseño Sismoresistente

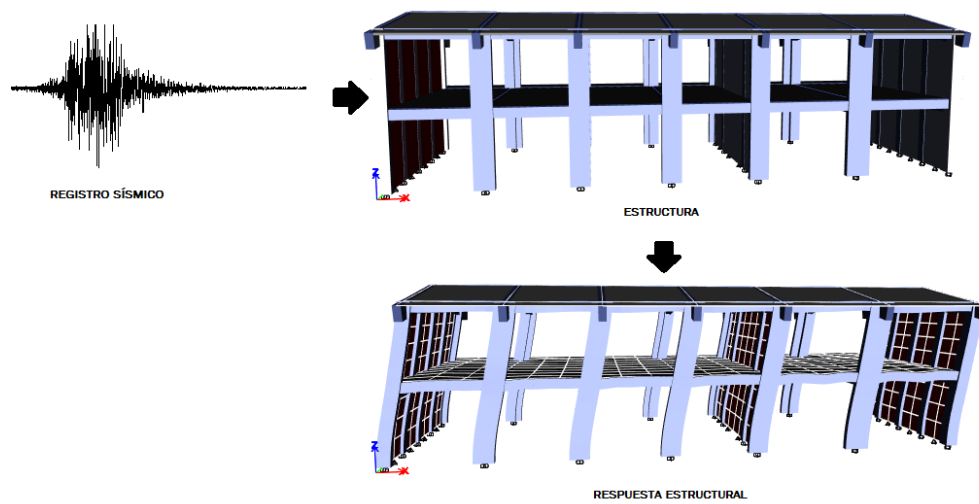
**Tabla N°06:** Periodos “Tp” y “TL”

	Perfil de suelo			
	S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
T <sub>P</sub> (s)	0,3	0,4	0,6	1,0
T <sub>L</sub> (s)	3,0	2,5	2,0	1,6

**Fuente:** Tomado de: R.N.E. Norma E.030 Diseño Sismoresistente

## 2.2.8 ANÁLISIS DINÁMICO

El análisis dinámico (tiempo historia) es un proceso ordenado de un análisis paso por paso de la respuesta dinámica de la estructura en donde cada intervalo de tiempo la carga puede variar. (Admuthé 2018). Este procedimiento emplea como demanda un registro sísmico que al aplicarlo a la estructura va a seguir una historia de movimiento dependiente de los contenidos de frecuencias y amplitudes de aceleración de esta (Gálvez, 2011).



**Figura N°19:** Esquema general del análisis dinámico (tiempo historia)

### 2.2.8.1 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

La respuesta de las edificaciones ante cargas cíclicas es un problema dinámico complejo. Debido a ello se han desarrollado procedimientos simplificados para tratar de equilibrar su complejidad con la eficiencia en su aplicación, estos son: análisis lineal estático, análisis estático no lineal y análisis dinámico lineal. En contraste, el análisis dinámico no lineal intenta simular de forma completa los modos de deformación y deterioro de la estructura desde el inicio del daño hasta el colapso (PEER/ATC 72).

Este método de análisis es el más realista para la predicción de la deformación y las fuerzas de respuesta de la estructura. Sin embargo, para que este análisis sea creíble se debe asegurar, de acuerdo con Ghobarah (2001) que: (1) los movimientos sísmicos apropiados para un lugar y un nivel específico de peligro sísmico sean generados con confianza, (2) el modelo estructural de la edificación sea realista, (3) el modelo de carga-deformación cíclica de cada elemento sea representativo de su comportamiento real, (4) los procesos de análisis y herramientas de

interpretación sean confiables y la identificación de modos y (5) las secuencias de los componentes de fallas de los elementos sean también realistas.

Es por eso que sus resultados son muy dependientes del nivel de detalle del modelo de análisis (de tal forma que represente el comportamiento no lineal de los elementos estructurales) y de los registros sísmicos usados en el análisis (Deier, G. et al. 2010). Esta dependencia hace al análisis sensible a cambios en las configuraciones del modelo y resultados distintos con cada registro sísmico.

### **2.2.8.1.1 PROPIEDADES NO LINEALES DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO**

#### **A) PROPIEDADES NO LINEALES EN MATERIALES**

##### **A.1 Concreto armado**

###### **Modelo constitutivo de Mander**

Mander et al. (1988) propuso un enfoque unificado de tensión deformación para concreto confinado basado en investigaciones anteriores. Este modelo puede ser aplicado a elementos de refuerzo transversal circular o rectangular, para tasas lentas o cuasi-estáticas de deformación y carga monotónica. De acuerdo con el autor, la resistencia a la compresión longitudinal  $f'_c$  está dado por:

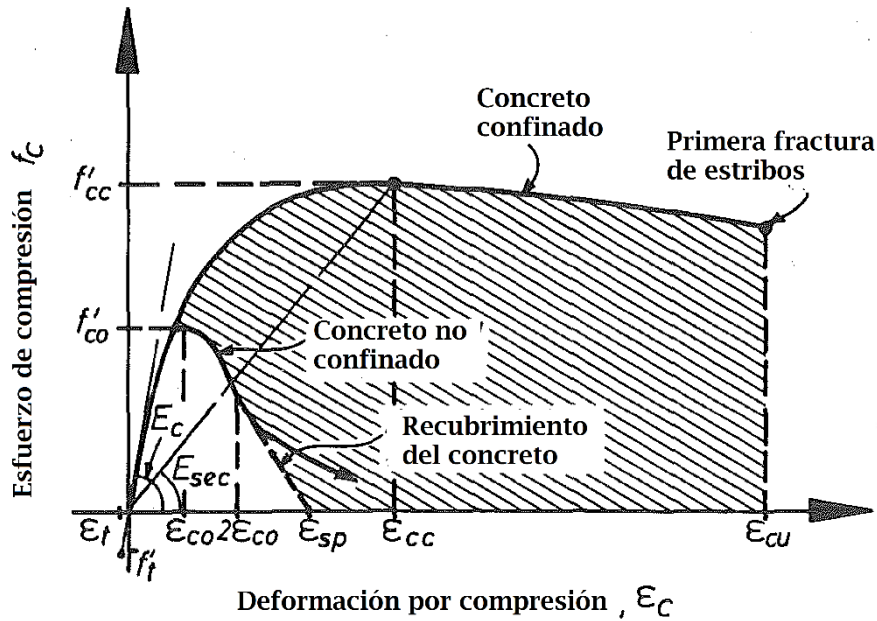
$$f_c = \frac{f'_{cc}}{r-1+x'} \quad (9)$$

Donde  $f'_{cc}$ : resistencia a la compresión de concreto confinado

Además,  $x = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{cc}}$

Donde  $\epsilon_c$ : deformación longitudinal de concreto en compresión

$$\epsilon_{CC} = \epsilon_{c0} \left[ 1 + 5 \left( \frac{f'_{cc}}{f'_{c0}} - 1 \right) \right] \quad (10)$$



**Figura N°20:** Modelo de esfuerzo-deformación de concreto en compresión

**Fuente:** Adaptado de Mander et. al. (1988)

Donde  $f'_{co}$  es la resistencia de concreto no confinado y  $\epsilon_{co}$  es su correspondiente deformación, sumida usualmente como 0.002.

$$r = \frac{E_c}{E_c - E_{sec}} \quad (11)$$

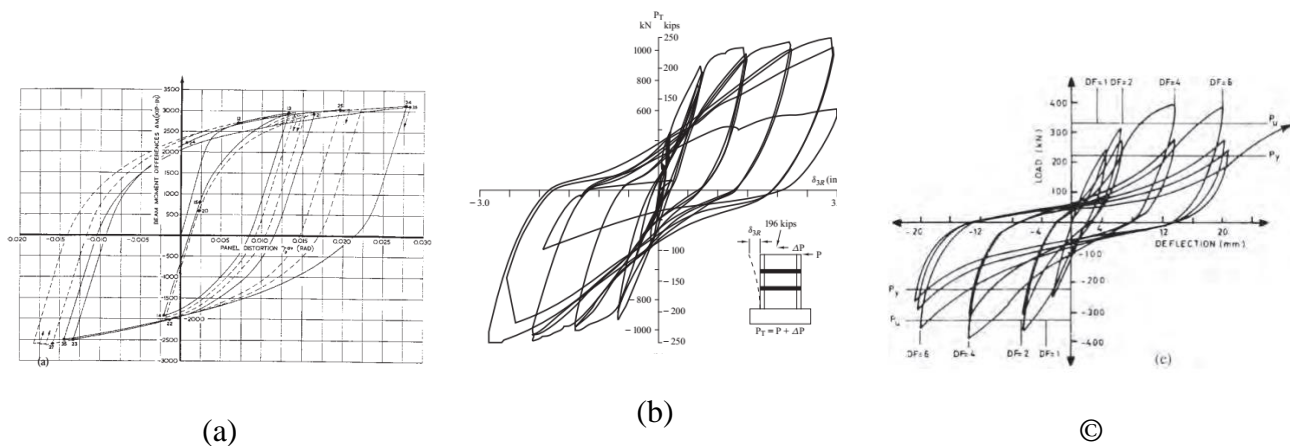
Donde:

$$E_c = 5000\sqrt{f'_{co}} \text{ (MPa)}, \text{ es el módulo de elasticidad del concreto y } E_{sec} = \frac{f'_{cc}}{\epsilon_{cc}}$$

## B) RELACIÓN FUERZA DEFORMACIÓN BAJO CARGAS CÍCLICAS

Cuando un elemento es sometido a cargas cíclicas, su comportamiento es definido bajo relaciones de fuerza deformación, denominadas relaciones de histéresis. Estas se componen de una serie de reglas en las cuales la variación de la fuerza es definida en términos de la historia de variación del desplazamiento durante ciclos de carga y descarga (Sucuogluo y Akkar 2014).

Durante un sismo los componentes estructurales se someten a movimientos con deformaciones cíclicas. Para entender su comportamiento, a lo largo de los años se han llevado a cabo múltiples ensayos que simulan estas condiciones en elementos estructurales, modelos de estructuras a escala reducida y pequeñas estructuras a escala real. De esta forma, los resultados muestran que las relaciones fuerza deformación dependen del material y del sistema estructural (Chopra, 2014).



**Figura N°21:** Relaciones fuerza-deformación para componentes estructurales de diferentes materiales: (a) acero estructural, (b) concreto armado y (c) albañilería.

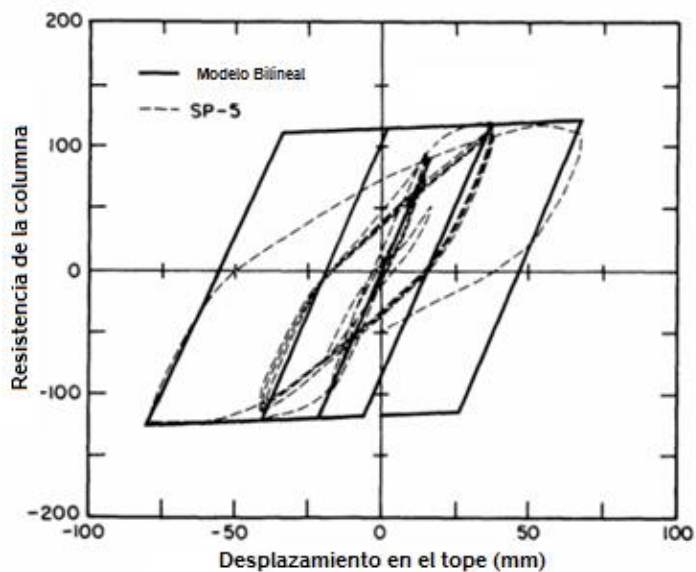
**Fuente:** Tomado de Chopra (2014)

Estas relaciones de fuerza-deformación son simplificadas mediante modelos denominados *modelos de histéresis*.

### B.1 Modelos de histéresis en concreto armado

#### Modelo Bilineal

En el modelo bilineal una pendiente positiva es asignada para tomar en cuenta la rigidez después de la fluencia. Este modelo no representa la degradación de rigidez en carga y descarga con cambios en la amplitud del desplazamiento (Otani 1980).

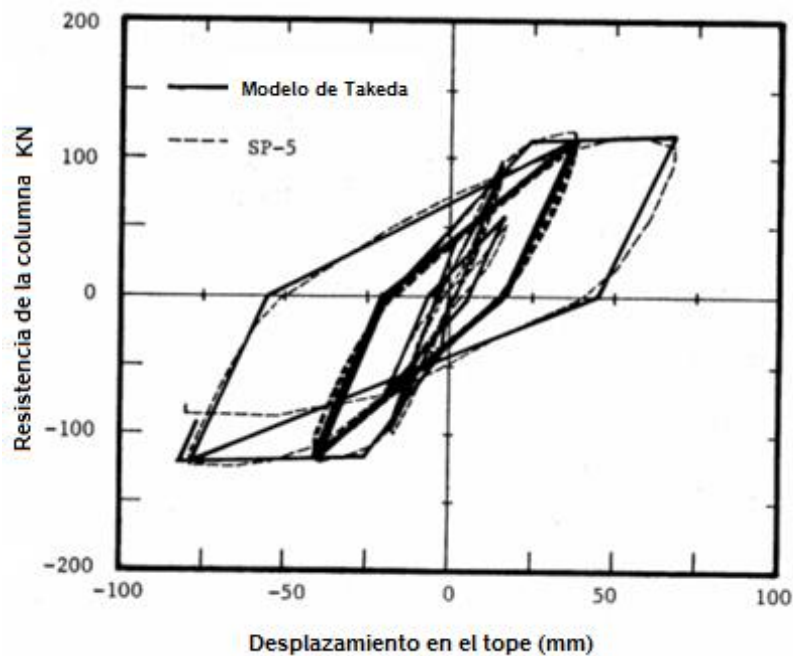


**Figura N°22:** Modelo Bilineal de los ciclos de histéresis

**Fuente:** Adaptado de Otanni (1980)

## Takeda

Es un modelo más sofisticado de las relaciones de histéresis introducido por Takeda en 1970. Este incluye cambios en las características de rigidez y endurecimiento.



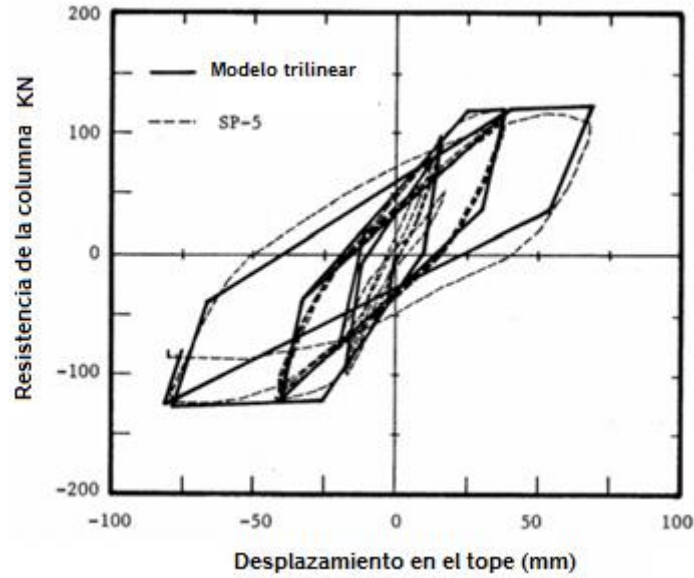
**Figura N°23:** Modelo histérico de Takeda

**Fuente:** Adaptado de Otanni (1980)

## Trilinear

Es un modelo que simula en gran medida las características de rigidez a la flexión. Hasta el punto de cedencia, el modelo se comporta como un modelo bilineal. Una vez la deformación excede el punto de cedencia, el modelo se comporta como un sistema elastoplástico perfecto. Al descargar, el punto de descarga se comporta como un nuevo punto de cedencia, y las rigideces de descarga correspondientes a pre y post agrietamiento se reducen proporcionalmente de tal forma que el comportamiento se convierte de tipo bilineal en un rango entre los puntos de cedencia positivos y negativos (Otani, 1980)





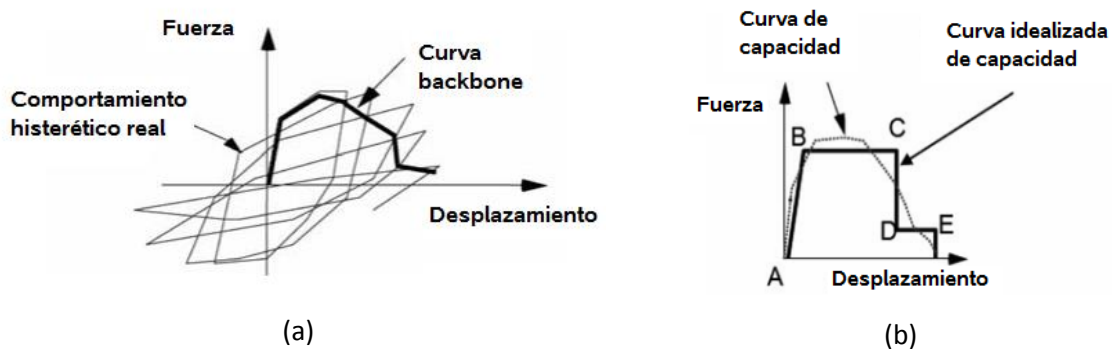
**Figura N°24:** Modelo histérico trilinear

**Fuente:** Adaptado de Otanni (1980)

### Curvas de Backbone

Como se ha visto en las relaciones anteriores, el comportamiento plástico de un elemento estructural durante un sismo es cíclico, esto es, después de un ciclo de carga y descarga las propiedades de la curva de histéresis (fuerza-deformación) cambian.

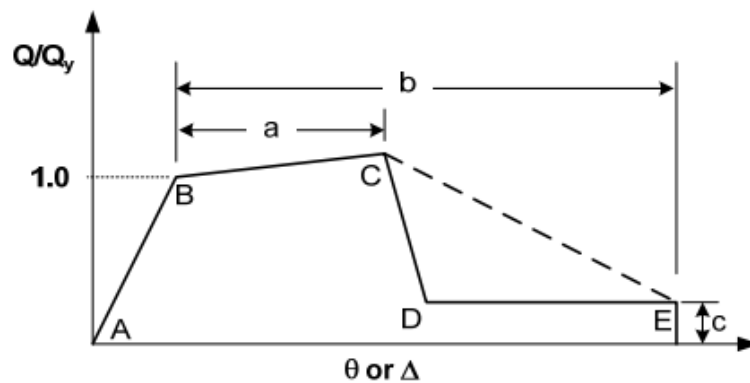
La curva de envolvente “backbone curve” es una relación simple de fuerza deformación que toma en cuenta la envolvente de las líneas de borde de cada curva de histéresis, incluyendo implícitamente la degradación de rigidez y energía ante carga cíclica.



**Figura N°25:** (a) “Backbone curve” para un comportamiento histérico, (b) Idealización

**Fuente:** Adaptado de Ghodrati 2010

ASCE 41 y otros documentos como el FEMA 356 y PEER/ATC 72, presentan relaciones “backbone” entre fuerzas y deformaciones características de los componentes estructurales, para definir su comportamiento, parámetros de demanda y criterios de aceptación. Esta relación de fuerza-desplazamiento intenta representar degradación de resistencia debido a carga cíclica (Deier, G. et al. 2010).

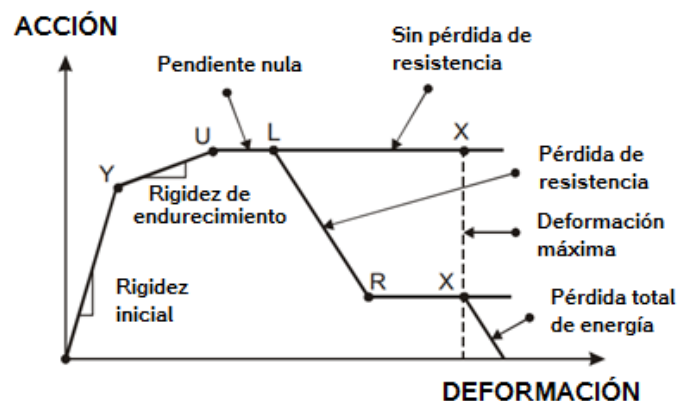


**Figura N°26:** Versión modificada de ASCE 41 curva fuerza-deformación. Los puntos mostrados son: cedencia efectiva (punto B), resistencia pico (C), resistencia residual (D), y deformación última (E)

**Fuente:** Tomado de PEER/ATC 72

Debido a que resultados experimentales sugieren que la drástica caída de resistencia entre el punto C y D es poco realista, PEER/ATC 72 recomienda usar una pendiente modificada que represente la degradación de resistencia después de que esta alcance su pico.

PERFORM-3D presenta una relación trilinear de fuerza-deformación con pérdida de resistencia opcional.



**Figura N°27:** Relación fuerza-deformación en Perform-3D

**Fuente:** Adaptado de Computers and Structures CSI (2011)

Donde:

Y: es el punto donde ocurre la primera cedencia del elemento y el comportamiento no lineal inicia.

U: es el punto donde la máxima resistencia es alcanzada.

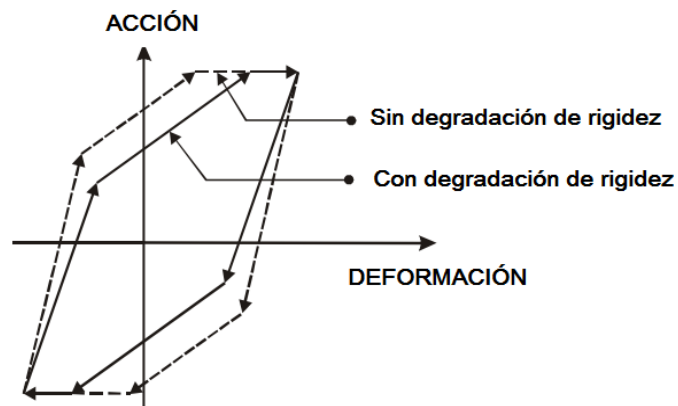
L: es el punto límite de ductilidad, donde inicia una pérdida significativa de resistencia.

R: es el punto de resistencia residual, donde la mínima resistencia residual es alcanzada.

X: es el punto límite de máxima deformación.

### C) FACTORES DE DEGRADACIÓN CÍCLICA DE ENERGÍA

La degradación de la rigidez de los elementos ante ciclos de carga y descarga están relacionados con la degradación de la energía que disipan. Esta es posible modelarla por medio de factores de degradación de energía (EDF por sus siglas en inglés). Los EDF son la relación entre un lazo de histéresis degradado y el área de un lazo no degradado (Al Mamun y Saatciolu 2017). Estos factores tienden a ser igual a 1.0 para ciclos de carga pequeños y van disminuyendo conforme la deformación se incrementa.

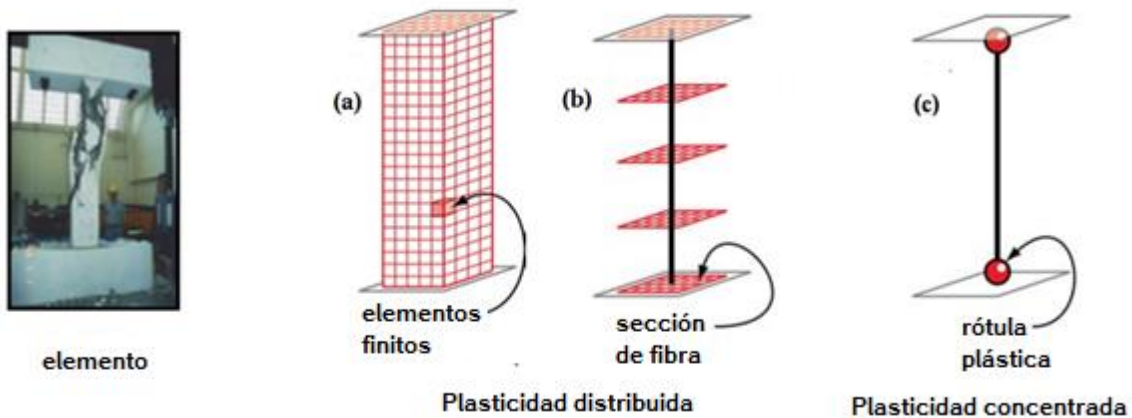


**Figura N°28:** Lazo de histéresis con degradación y sin degradación de rigidez

**Fuente:** Adaptado de Computers and Structures CSI (2011)

#### 2.2.8.1.2 TIPOS DE MODELOS PARA ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Los modelos no lineales de elementos estructurales son de gran importancia en el análisis dinámico. Estos, en general, se diferencian por el grado de idealización de la distribución de la plasticidad en su sección y a lo largo del elemento. De tal forma, los modelos pueden distribuir la plasticidad o concentrarla en puntos discretos.



**Figura N°29:** Tipos de modelos no lineales para análisis estructural (columnas y vigas). Los modelos que distribuyen la plasticidad son los de (a) elementos finitos y (b) secciones de fibra; y los de plasticidad concentrada (b) rótulas plásticas.

**Fuente:** Adaptado de Deier et al. 2010 y PEER/ATC 72

Los modelos continuos de elementos finitos configuran de forma explícita el comportamiento no lineal de los materiales y elementos que constituyen el componente. Estos incluyen elementos finitos que pueden representar el concreto, refuerzo longitudinal, refuerzo transversal, y sus respectivos modelos constitutivos. De tal forma, los modelos de este tipo no requieren la definición de rigideces, resistencia o límites de deformación. Del mismo modo, los modelos de secciones de fibra capturan algunos aspectos implícitos del comportamiento, como la integración de los esfuerzos y deformaciones de flexión a lo largo del elemento; y hacen necesaria caracterizar otros efectos explícitos, como la definición de la respuesta efectiva de esfuerzo-deformación (PEER/ATC, 20010).

Por otro lado, los modelos de rótulas plásticas están definidos completamente por la descripción de la respuesta total del comportamiento de esfuerzo-deformación del componente. Es así que, una rótula plástica puede representar la interacción de fuerza axial y momento por medio de una superficie de interacción (P-M) y parámetros observados a partir de resultados de ensayos en los componentes (PEER/ATC, 20010). Este modelo es el más simple y presenta formulaciones numéricas que permiten llegar a soluciones eficientes (Deier, G. et al. 2010).

## 2.2.9 DESEMPEÑO SÍSMICO

La interacción de los componentes estructurales durante un movimiento sísmico provoca comportamientos complejos en la estructura y una degradación de rigidez y resistencia que resulta en una acumulación de daño (Duerr, 2010). Esto hace difícil cuantificar con exactitud la respuesta que va a tener una edificación frente a un sismo y determinar si tuvo un comportamiento satisfactorio. Para poder evaluar este comportamiento, en los últimos años los códigos sísmicos han definido niveles de desempeño esperados. El ASCE 41-17 (2017) “Evaluación sísmica y reforzamiento de edificios existentes” establece los siguientes niveles de desempeño sísmico:

- **Operacional:** No se evidencian desplazamientos permanentes. La estructura mantiene su resistencia y rigidez original. Grietas menores en elementos estructurales. Todos los componentes de la edificación se encuentran en funcionamiento.
- **Ocupación inmediata o Funcional:** No se evidencian desplazamientos permanentes. La estructura mantiene sustancialmente su resistencia y rigidez original. Grietas en elementos estructurales y no estructurales.
- **Seguridad de vida:** Desplazamientos permanentes. Todavía tiene alguna resistencia y rigidez residual en todos los niveles. El edificio puede no ser económicamente reparable. Daños en los elementos estructurales y no estructurales.
- **Cerca de Colapso:** Grandes desplazamientos permanentes. Poca resistencia y rigidez residual. El edificio está cerca a colapsar.

### 2.2.9.1 DESEMPEÑO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS

Se han elaborado diferentes documentos que implementan y fijan los objetivos del diseño por desempeño, los más importantes son: SEAOC Vision 2000, ATC 40 y FEMA 356. Estos definen el desempeño en base a la medida de sus desplazamientos máximos de entre piso. Para este estudio se han empleado los niveles de desempeño que son mostrados en la tabla 01 resumidos a partir del trabajo de Ghobarah (2001) y los documentos mencionados anteriormente.

**Tabla 07:** Niveles de desempeño, estado de daño correspondiente y límites de derivas.

Nivel de desempeño	Estado de Daño	Deriva	Condición
Operacional	No hay daño	< 0.5%	Sin daño
Funcional	Daño menor	0.5 - 1.0%	Daño menor
Seguridad de Vida	Daño moderado	1.0 %- 2.0%	Reparable
Cerca al Colapso	Daño severo	2.0% - 4.0%	No reparable
Colapso	Colapso	Mayor a 4.0%	Pérdida del edificio

**Fuente:** Elaborado con base en FEMA 356 y Ghobarah (2016)

Respecto a la normativa peruana, la norma E.30 “Diseño sísmo resistente” establece un límite máximo de desplazamiento de entrepiso para estructuras de concreto armado de 0.7% que se ubica dentro del rango funcional.

### 2.2.9.2 DESEMPEÑO BASADO EN DAÑO:

El desempeño sísmico de una edificación basado en sus desplazamientos inelásticos tiene ciertas limitaciones en cuantificar el nivel de daño que se ha producido. Es por eso que muchos investigadores han sugerido que la cantidad de energía disipada en una estructura durante un sismo es un mejor indicador del daño estructural (Gosh et. al. 2011).

El parámetro usado en este estudio para medir el daño es el índice de daño, este 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 (1985) es uno de los índices de daño más usados en la literatura debido a que combina las deformaciones máximas y la energía histórica disipada:

$$DI_L = \frac{\delta_m}{\delta_u} + \beta_c \frac{E_i}{Q_y \delta_u} \quad (12)$$

$\frac{\delta_m}{\delta_u}$  : Deformación

$\beta_c \frac{E_i}{Q_y \delta_u}$  : Energía disipada

Donde  $DI_L$  es el índice de daño local,  $\delta_m$  es la deformación máxima del elemento (capacidad),  $\delta_u$  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  $E_i$  es la energía histerética disipada.

Este parámetro de demanda ha sido calibrado por Park et al. (1985) mediante la inspección a edificios dañados durante los terremotos de San Fernando 1971 en Estados Unidos y el

terremoto de Miyagiken-Oki 1978 en Japón. De tal forma que es posible relacionar su estado de daño a su nivel de desempeño como se muestra en la Tabla N°08.

**Tabla N° 08:** Niveles de desempeño relacionados al índice de daño alcanzado

Nivel de desempeño	Estado de Daño	Índice de Daño	Condición
Operacional	No hay daño	< 10%	Sin daño
Funcional	Daño menor	10% - 25%	Daño menor
Seguridad de Vida	Daño moderado	25% – 40%	Reparable
Cerca al Colpaso	Daño severo	40% - 100%	No reparable
Colapso	Colapso	Mayor a 100%	Pérdida del edificio

**Fuente:** Elaborado en base a Park et al. (1985)

El índice de daño por nivel de piso puede ser estimado como el promedio ponderado de los índices de daños de los elementos estructurales, tomando a la energía disipada como el factor de ponderación.

$$DI_T = \frac{\sum_i^n DI_{Li} * E_i}{E_T} \quad (13)$$

Donde  $DI_T$  es el índice de daño global de la edificación en base al cual se evaluará el desempeño de los edificios 2H y 4F

### 2.2.10 INCERTIDUMBRES EN EL ANALISIS SÍSMICO

La variabilidad de los resultados que se pueden obtener en un análisis sísmico puede ser agrupada en tres fuentes principales. Estos son: (a) incertidumbre en el peligro sísmico, debido a las intensidades de los movimientos sísmicos calculados para un escenario o periodo de retorno; (b) incertidumbre en los registros, debido a la variabilidad en sus contenidos de frecuencia y duración; y (c) el comportamiento estructural, que depende de las propiedades de los materiales, geometría de los elementos, etc; comportamiento no lineal de los componentes y sistemas; y de la representación matemática de la estructura (Deier, G. et al. 2010).

La combinación de estos, si bien hacen posible la construcción de un análisis racional, contribuyen a elevar la incertidumbre en los resultados obtenidos. Entender estas limitaciones antes, durante y después del proceso de análisis es fundamental para la mejora continua de las evaluaciones sísmicas.

## 2.3 DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

**Peligro sísmico:** escenario para el cual se ha definido, a partir de estudios, la ocurrencia de eventos sísmicos con una magnitud determinada.

**Espectro objetivo:** espectro de aceleraciones que caracteriza el peligro sísmico en un determinado lugar y sirve como modelo para el ajuste espectral de registros sísmicos.

**Registro sísmico:** conjunto de aceleraciones respecto al tiempo registradas en una estación sísmica.

**Desplazamientos de entrepiso:** desplazamientos horizontales medidos en cada nivel de piso, producidos por las solicitaciones a las que está expuesta la edificación.

**Derivas de entrepiso:** es el desplazamiento relativo de cada nivel de piso respecto a su altura.

**FEMA 356:** Prestandard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings (Prestandar y Comentarios para la Rehabilitación Sísmica de Edificios) fue desarrollada por la Sociedad de Ingenieros Civiles de América (ASCE) en el año 2000.

**Índice de daño:** es un parámetro de demanda que cuantifica el daño producido en un elemento estructural o un edificio, en términos de desplazamiento y energía disipada.

**Ciclo histerético:** refiere a las relaciones de fuerza deformación que se producen en un elemento en el rango inelástico.

**Ajuste espectral:** procedimiento mediante el cual es posible escalar un registro sísmico en base a un espectro objetivo en todos sus contenidos de frecuencia.

**Rótula plástica:** modelo idealizado de plasticidad concentrada usado en el análisis no lineal.

**Parámetro de demanda:** valor que cuantifica el nivel de respuesta de una edificación ante una solicitación externa.

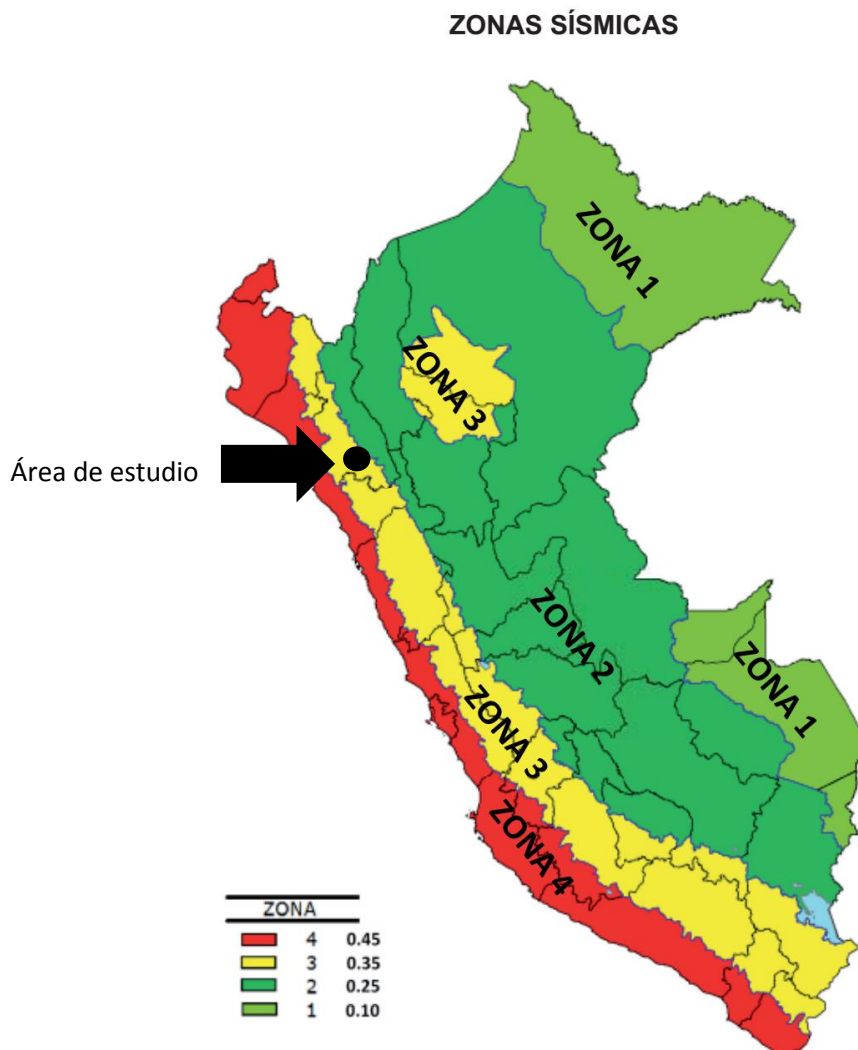
**Visión2000:** Performance Based Seismic Engineering of Buildings (Ingeniería Sísmica basada en Desempeño de Edificios) fue desarrollado por la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC) en 1995



## CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODOS

### 3.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

En la presente investigación se ha estimado el efecto de incorporar réplicas en la evaluación del desempeño sísmico de edificaciones porticadas de concreto armado. Para ello se han seleccionado los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca; ubicados en la provincia, distrito y departamento de Cajamarca.



**Figura N°31:** Ubicación del área de estudio en el mapa de zonificación sísmica del Perú

**Fuente:** Adaptado de MVCS (2019)



**Figura N°31:** Ubicación de edificio 2H y 4F en el campus de la Universidad Nacional de Cajamarca en coordenadas UTM WGS 84

### 3.2 ÉPOCA DE INVESTIGACIÓN

La investigación se ha realizado en el año 2019 entre los meses de mayo y setiembre, de acuerdo a lo establecido en el plan de tesis.

### 3.3 PROCEDIMIENTO

#### 3.3.1 DESCRIPCIÓN DE LAS EDIFICACIONES EN ESTUDIO

##### 3.3.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

###### A) EDIFICIO 2H

Este edificio fue construido entre los años 2005 y 2006, y pertenece a la Escuela Académico Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la Universidad Nacional de Cajamarca.



(a)



(b)

**Figura N°32:** Fotografías de edificio 2H: (a) Vista Frontal (b) Vista Posterior

Su configuración estructural se compone de pórticos resistentes a momento en las dos direcciones con aligerados de 20 cm de espesor. Tiene un área construida de 840 m<sup>2</sup> por nivel.

Posee tres niveles:

- Primer Nivel: 04 laboratorios, 05 aulas y servicios higiénicos.
- Segundo Nivel: 01 auditorio, 01 laboratorio, 01 sala de profesores, 01 aula, 03 oficinas, servicios higiénicos y pasadizos.
- Tercer Nivel: 02 laboratorios, 01 sala de capacitación múltiple, 01 centro de cómputo, 02 oficinas, 01 biblioteca, servicios higiénicos y pasadizos.

## B) EDIFICIO 4F

Este edificio pertenece a la Escuela Académico Profesional de Derecho de la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas de la Universidad Nacional de Cajamarca.



(a)



(b)

**Figura N°33:** Fotografías de edificio 4F: (a) Vista Posterior (b) Vista Frontal

Su configuración estructural se compone de pórticos resistentes a momento en las dos direcciones con aligerados de 20 cm de espesor. Tiene un área construida de 840 m<sup>2</sup> por nivel. Posee tres niveles:

- Primer Nivel: 04 aulas, 03 oficinas y 01 servicio higiénico.
- Segundo Nivel: 05 aulas, 02 oficinas y 01 servicio higiénico.

- Tercer Nivel: 03 aulas, 02 oficinas, 01 auditorio y 01 servicio higiénico.

### A) Propiedades y especificaciones técnicas de los elementos estructurales de los edificios

Las propiedades de los elementos estructurales de ambos edificios se muestran a continuación. Dichas propiedades han sido obtenidas de las investigaciones realizadas por Bolaños (2015) y por Orrillo (2014). En ambos casos se determinó experimentalmente la resistencia a la compresión del concreto en vigas y columnas por medio de ensayo de esclerometría.

**Tabla N°09:**

Propiedades de los materiales de los elementos estructurales de los edificios 2H y 4F

PROPIEDADES		EDIFICIO 2H	EDIFICIO 4F
Resistencia a la compresión $f_c$	Vigas	210 Kg/cm <sup>2</sup>	175 Kg/cm <sup>2</sup>
	Columnas	185 Kg/cm <sup>2</sup>	165 Kg/cm <sup>2</sup>
	Losas aligeradas	210 Kg/cm <sup>2</sup>	210 Kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad $E$	Vigas	217370.65 Kg/cm <sup>2</sup>	198431.35 Kg/cm <sup>2</sup>
	Columnas	204022.06 Kg/cm <sup>2</sup>	192678.49 Kg/cm <sup>2</sup>
Peso unitario del concreto		2400 Kg/m <sup>3</sup>	2401 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Poisson		0.2	0.2
Recubrimiento de columnas		4 cm	4 cm
Recubrimiento de vigas		4 cm	4 cm
Esfuerzo de fluencia del acero $f_y$		4200 Kg/cm <sup>2</sup>	4200 Kg/cm <sup>2</sup>
Peso unitario del acero		7850 Kg/cm <sup>2</sup>	7850 Kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad del acero		2100000 Tn/m <sup>2</sup>	2100000 Tn/m <sup>2</sup>

**Fuente:** Tomado de Orrillo (2014) y Bolaños (2015)

### B) Metrado de cargas

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. Se presenta en el Anexo 01.

### 3.3.2 ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO

El desempeño sísmico de ambos edificios ha sido evaluado por medio de dos indicadores: derivas de entrepiso e índice de daño. El primero relacionado a los desplazamientos de entrepiso que sufre la estructura y el segundo a la cantidad de energía disipada durante el evento sísmico.

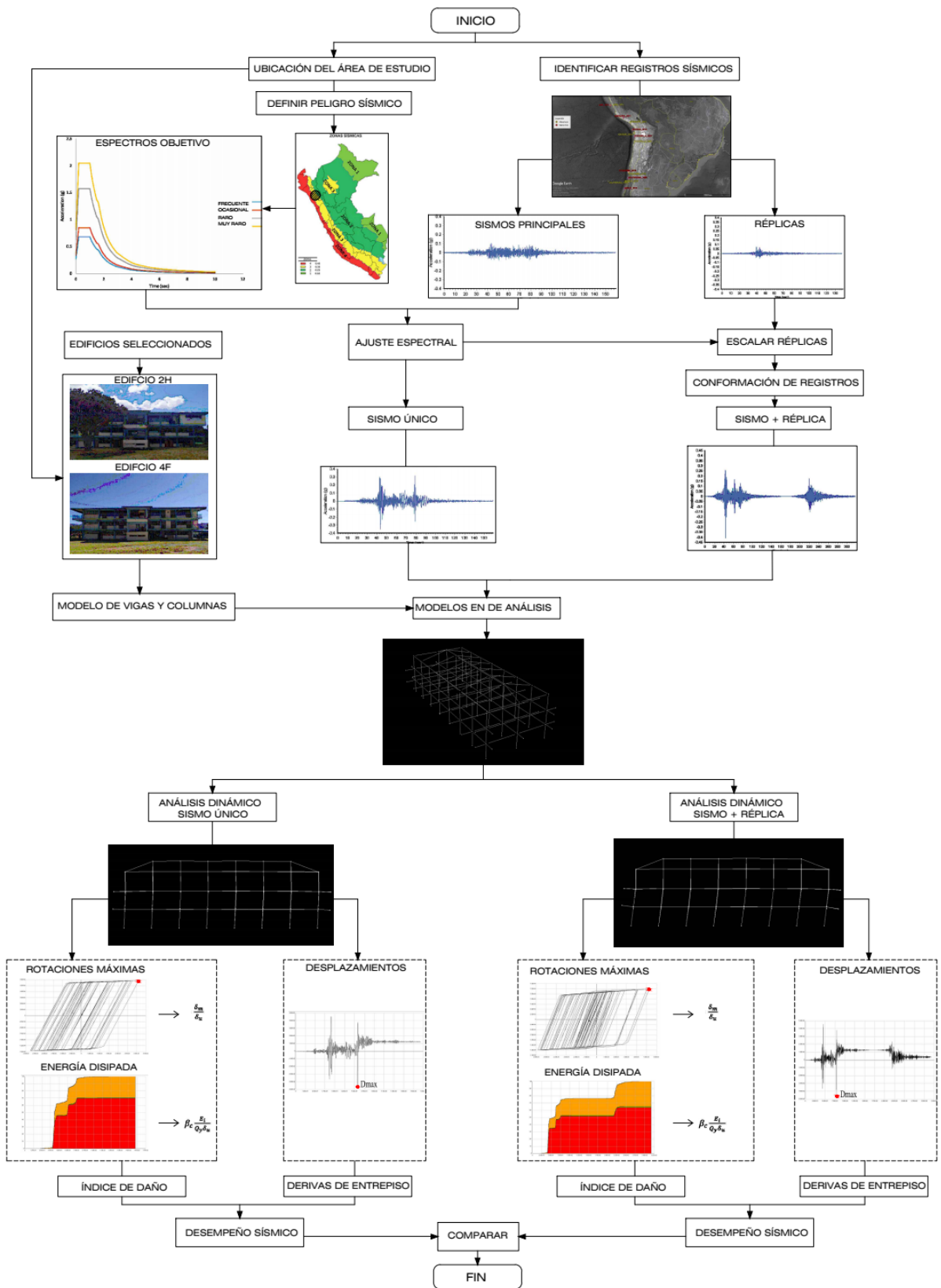


Figura N°34: Esquema general de la metodología seguida en este estudio

**Tabla N°10:** Parámetros Sísmicos Para La Construcción Del Espectro De Respuesta De La Norma E.030

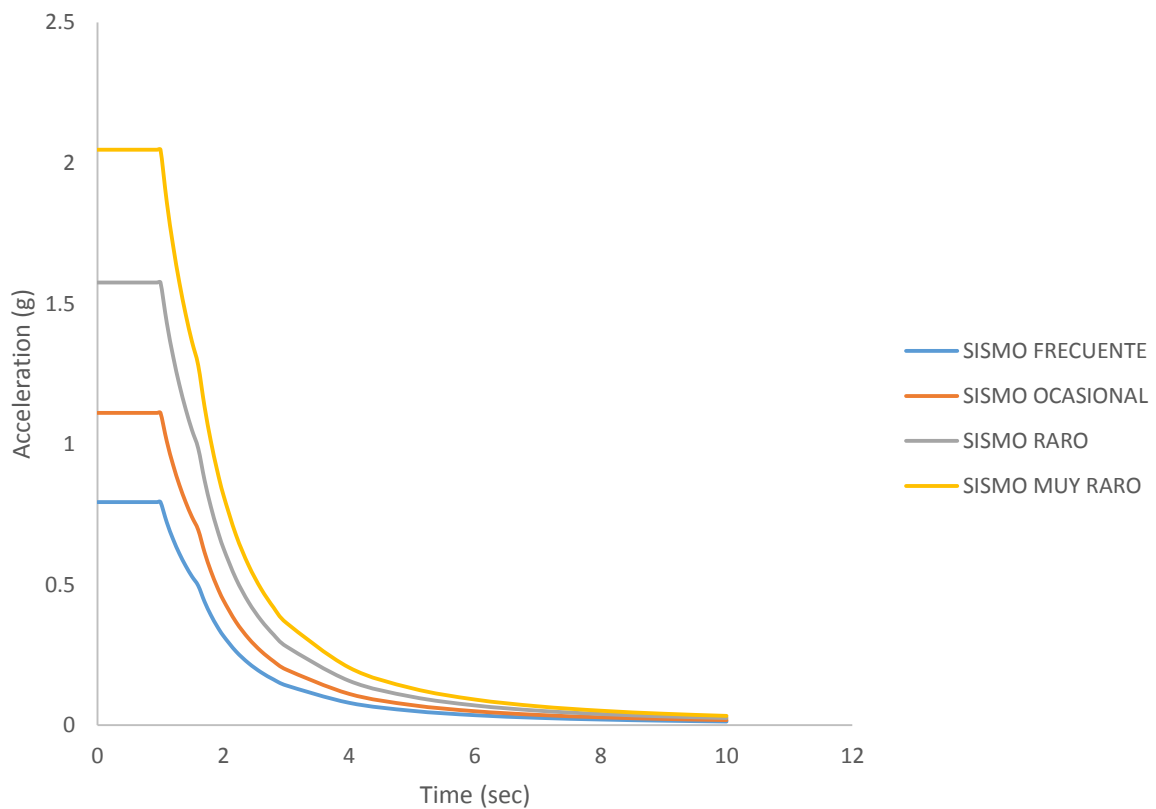
Ítem	Descripción	Parámetro	EDIFICIO	
			2H	4F
Categoría	Edificación esencial	A,B,C,D	A	A
Sistema Estructural	Sistema de pórticos	-	Pórticos	Pórticos
Configuración Estructural	Sin irregularidades en planta y en altura	Regular/Irregular	Regular	Regular
Factor de zona	Distrito de Cajamarca	Z	0.35	0.35
Factor de uso	Categoría A	U	1.5	1.5
Factor de reducción	Sistema de pórticos	R	8	8
Tipo de Suelo	Suelo flexible	S	S3	S3
Periodo que define la plataforma de respuesta	Depende del tipo de suelo	Tp	1	1
Peso de la edificación	-	P	CP + 50% CV	CP + 50% CV
Factor de amplificación sísmica	Factor de amplificación de la aceleración estructural respecto a la aceleración del suelo	C	2.5 Tp/T	2.5 Tp/T

### 3.3.2.1 PELIGRO SÍSMICO EN LA ZONA DE ESTUDIO

El primer paso en la estimación del desempeño sísmico es definir los niveles de peligro sísmico a los que van a estar expuestas las edificaciones. Es decir, estimar los valores de aceleración que se espera que ocurran en el área de influencia del proyecto en un periodo de retorno específico. Luego, estimar el desempeño sísmico de la edificación en cada posible escenario.

#### A. ESPECTROS DE RESPUESTA CONSTRUIDOS (SISMO FRECUENTE, OCASIONAL, RARO Y MUY RARO)

Los espectros de respuesta que caracterizan el peligro sísmico de la zona de estudio, para diferentes periodos de retorno se han determinado según el ítem 2.2.7.4-B.



**Figura N°35:** Espectros de respuesta para sismo frecuente, ocasional, raro y muy raro



### 3.3.2.2 REGISTROS SÍSMICOS

#### 3.3.2.2.1 SELECCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS

En esta investigación se han empleado registros de sismos (compuestos de dos pares de componentes horizontales EW y NS) ocurridos a lo largo de la costa de Perú y Chile, con el objeto de tener características similares en su régimen tectónico.

Estos registros sísmicos seleccionados se obtuvieron de la base de datos del CISMID Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de desastres<sup>1</sup>, la base de datos del Centro Sísmológico Nacional de la Universidad de Chile CSN<sup>2</sup>, la base de datos del Center of Engineering Strong Motion Data (CESMD<sup>3</sup>) Y la base de datos de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile FCFM<sup>4</sup>.

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:

- Eventos principales moderados  $M_w > 6$  que sean representativos en la sismicidad histórica de cada país.
- Profundidad de ruptura  $< 60$  km (sismos superficiales)
- 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.

La siguiente tabla muestra los registros sísmicos seleccionados:

---

<sup>1</sup> Ver: <http://cecos.cismid-uni.org/cecos-redacis.html>

<sup>2</sup> Ver: <http://evtdb.csn.uchile.cl/events>

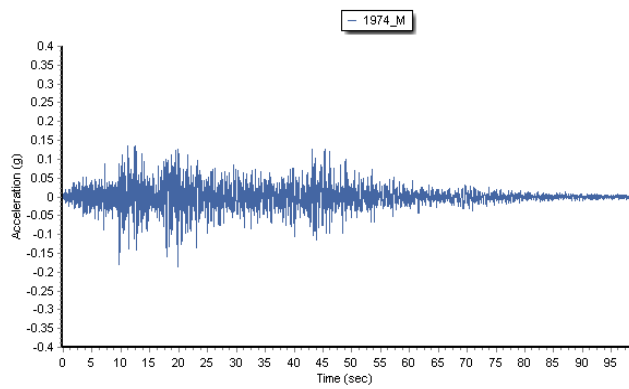
<sup>3</sup> Ver: <https://strongmotioncenter.org/>

<sup>4</sup> Ver: <http://terremotos.ing.uchile.cl/registros/>

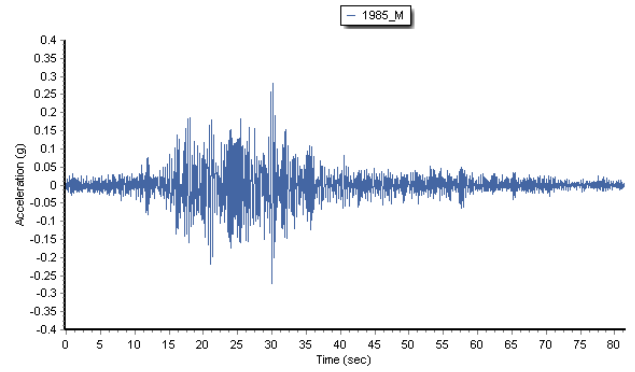
**Tabla N°11: Registros Sísmicos Seleccionados**

N°	NOMBRE		Ubicación		Magnitud Mw	PGA		Profundidad Km	Fecha	Hora UTC	Base de datos
			LAT	LONG		NS	EW				
1	Terremoto de Tocopilla	Sismo Principal	-22.42	-70.13	7.7	0.45	0.41	38.9	14/11/2007	15:40:18	RENADIC
		Réplica	-23.13	-70.52	6.0	0.08	0.10	38.7	15/11/2007	15:05:15	RENADIC
2	Terremoto de Maule	Sismo Principal	-36.29	-73.24	8.8	0.35	0.33	30.1	27/02/2010	03:34:08	RENADIC
		Réplica	-33.96	-72.87	6.1	0.09	0.09	30.0	27/02/2010	07:30:30	RENADIC
3	Terremoto de Iquique	Sismo Principal	-19.57	-70.91	8.2	0.11	0.17	38.0	01/04/2014	23:46:45	CSN
		Réplica	-20.52	-70.44	7.6	0.07	0.06	27.0	03/04/2014	02:43:15	CSN
4	Terremoto de Coquimbo	Sismo Principal	-31.51	-71.86	8.4	0.48	0.49	11.0	16/09/2015	22:54:28	CSN
		Réplica	-31.62	-71.75	7.1	0.09	0.09	26.0	16/09/2015	22:59:15	CSN
5	Terremoto de Valparaiso	Sismo Principal	-33.14	-71.87	7.8	0.22	0.28	33.0	03/03/1985	22:47:07	CESMD
		Réplica	-34.13	-71.62	7.2	0.16	0.11	37.8	09/04/1985	01:56:59	CESMD
6	Lima	Sismo Principal	-12.50	-77.98	7.9	0.17	0.19	13.0	03/10/1974	14:21:00	CISMID
		Réplica	-12.52	-77.59	6.3	0.07	0.05	12.8	09/11/1974	12:59:54	CISMID
7	Arequipa	Sismo Principal	-17.40	-71.67	7.8	0.23	0.29	33.0	23/06/2001	20:33:00	CISMID
		Réplica	-16.08	-73.77	6.3	0.12	0.13	33.0	07/07/2001	09:39:05	CISMID

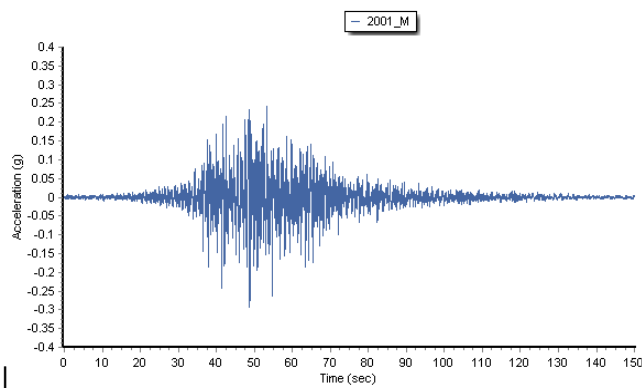
\* La magnitud de los eventos sísmicos se ha homogenizado según las fórmulas empleadas en Bernal et al. (2014):  $M_s = 1.644m_b - 3.753$   $m_b < 5.9$ ,  $M_s = 2.763m_b - 10.301$   $m_b > 5.9$ ,  $M_w = 0.67 M_s + 2.07$   $3.0 < M_s < 6.1$ , y  $M_w = 0.99M_s + 0.08$   $6.2 < M_s < 8.2$ .



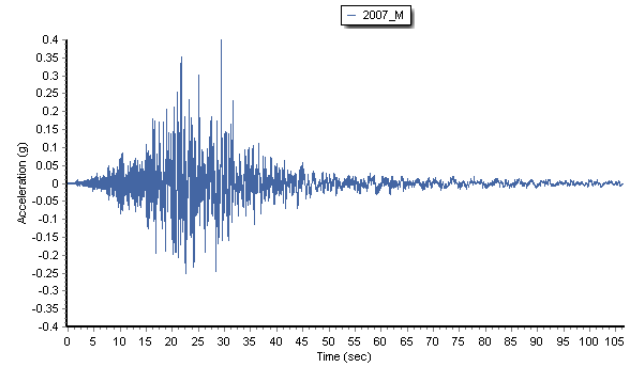
(a)



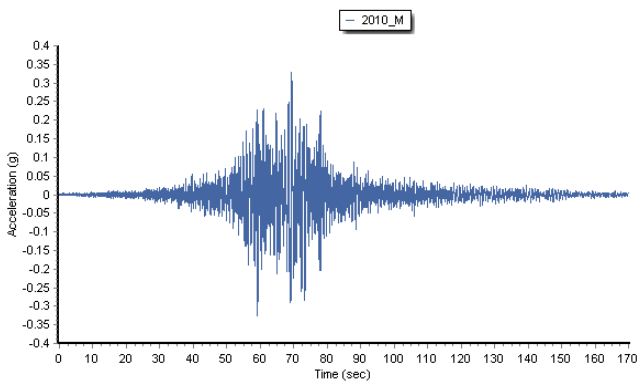
(b)



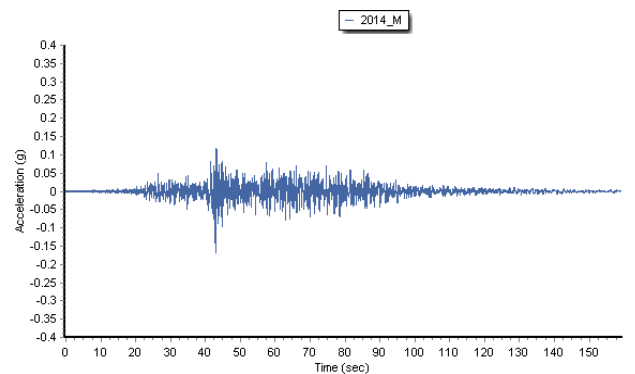
(c)



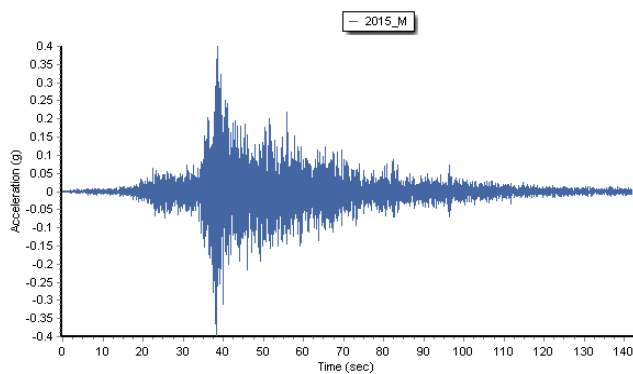
(d)



(e)

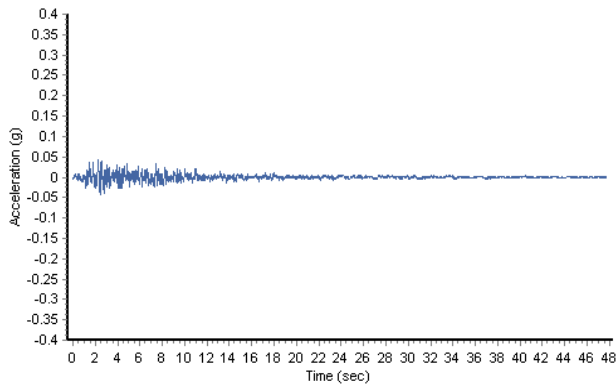


(f)

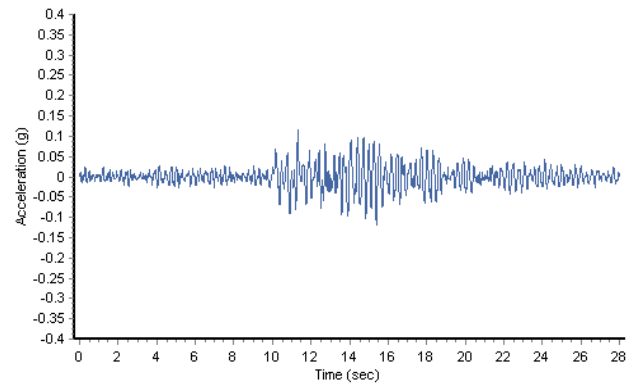


(g)

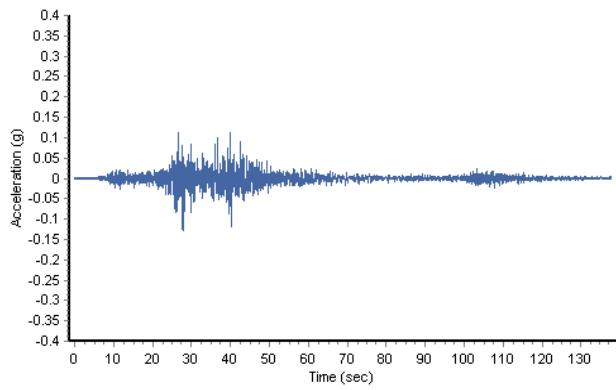
**Figura N°36:** Sismos principales (mainshocks) componente EW: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.



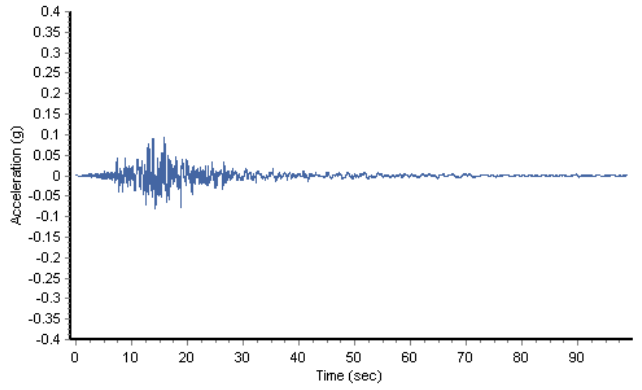
(a)



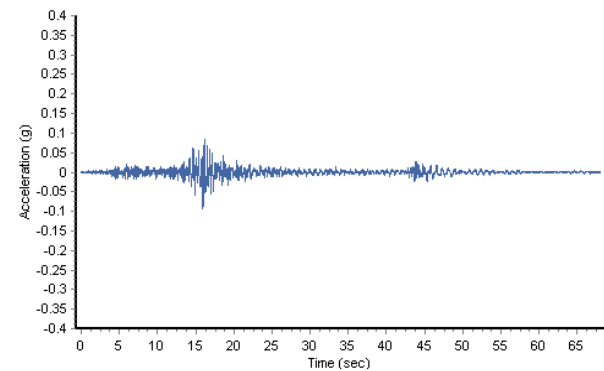
(b)



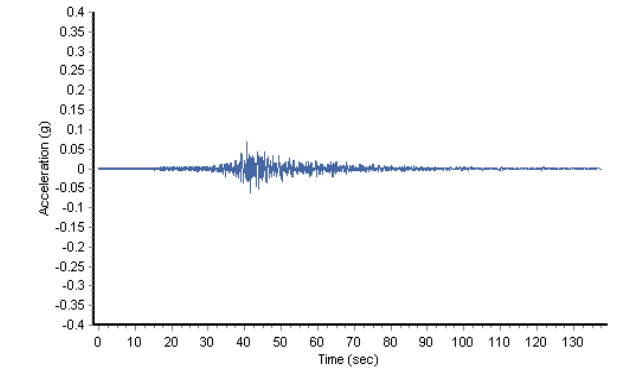
(c)



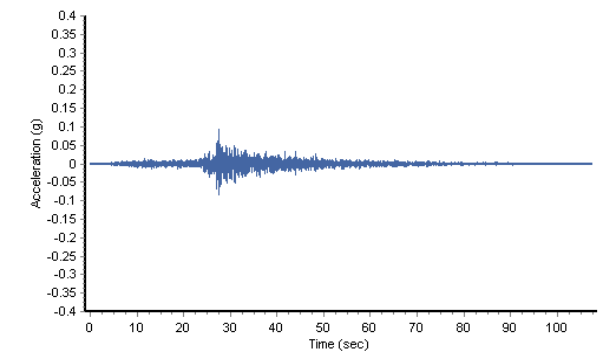
(d)



(e)

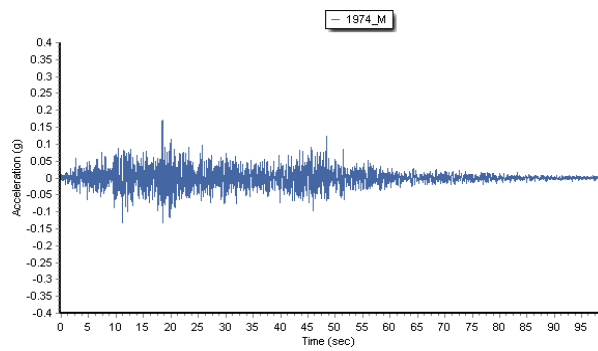


(f)

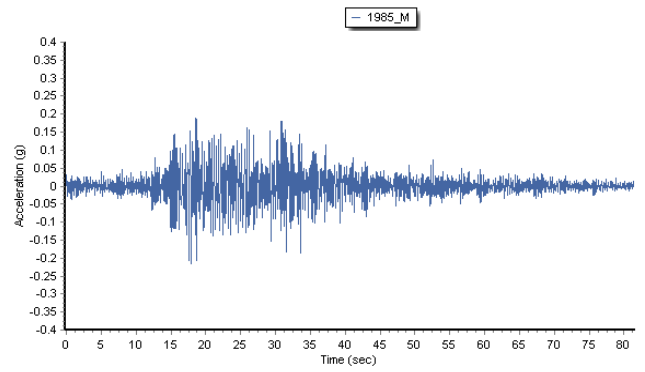


(g)

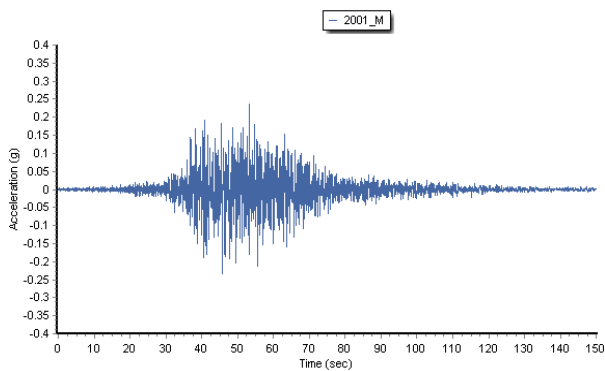
**Figura N°37:** Réplicas (aftershocks) componente EW: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.



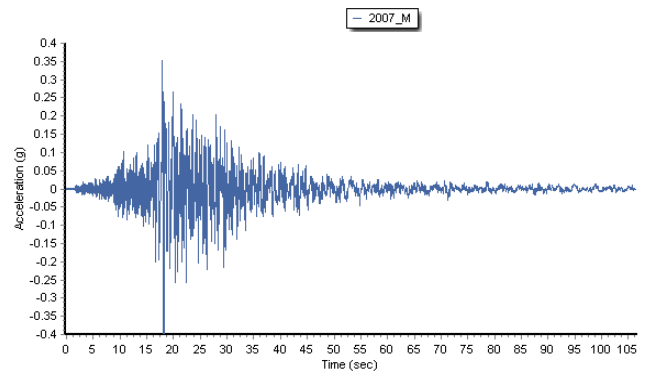
(a)



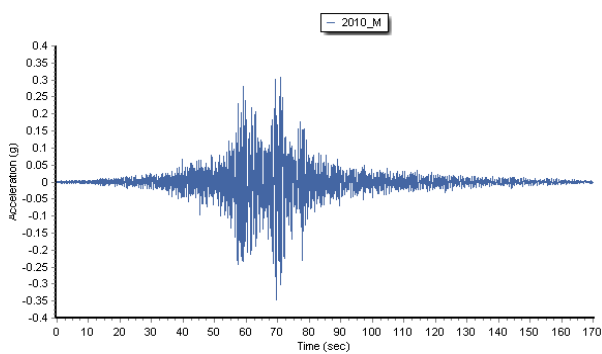
(b)



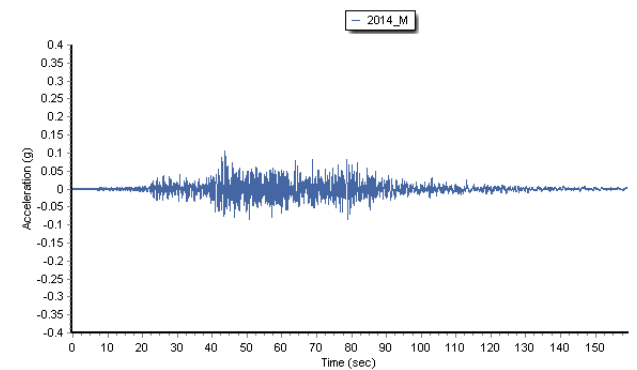
(c)



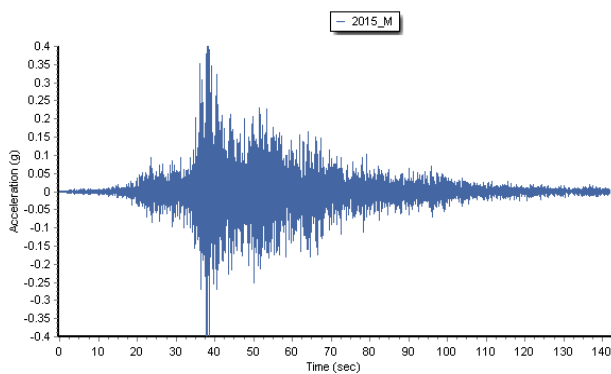
(d)



(e)

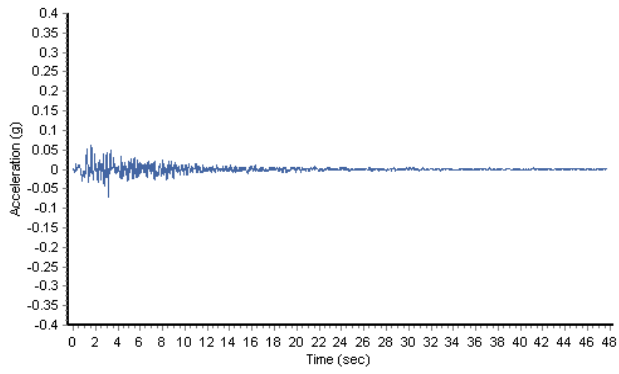


(f)

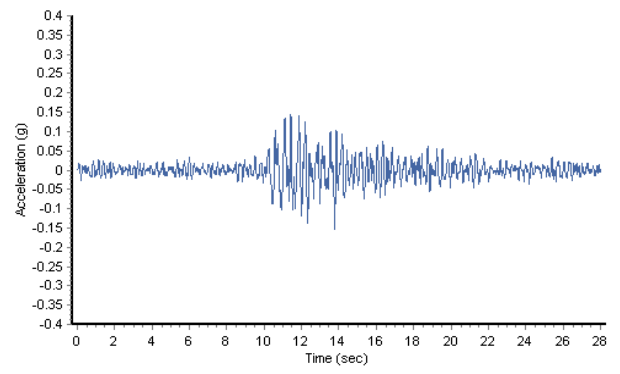


(g)

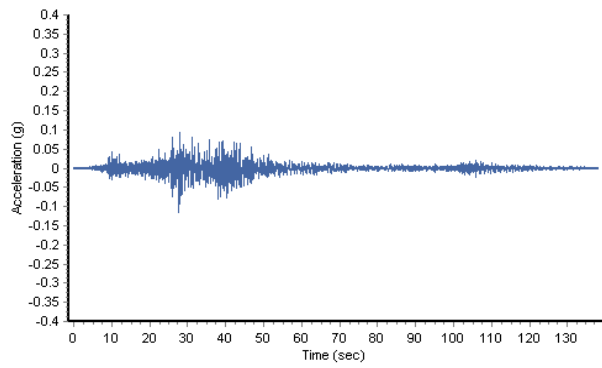
**Figura N°38:** Sismos principales (mainshocks) componente NS: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.



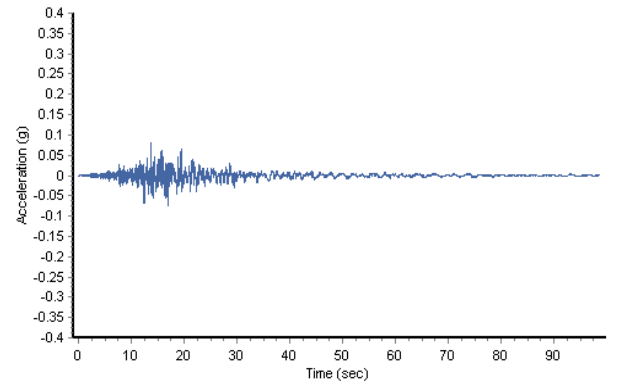
(a)



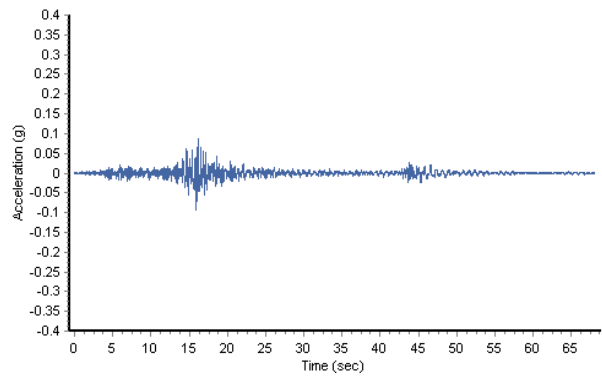
(b)



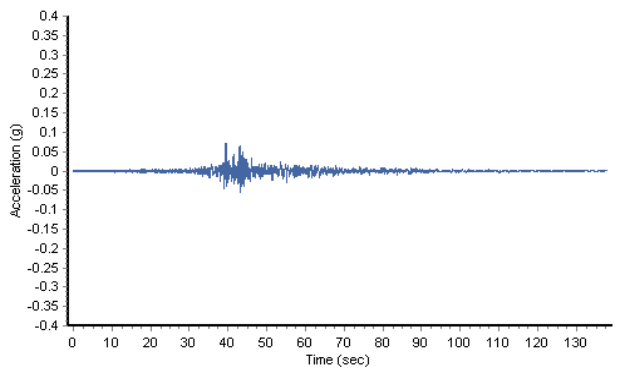
(c)



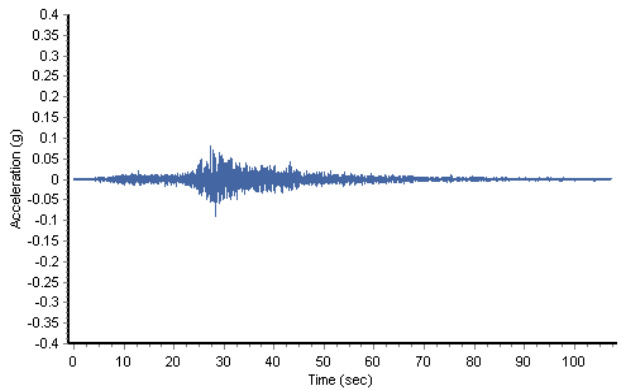
(d)



(e)



(f)



(g)

**Figura N°40:** Réplicas (aftershocks) componente NS: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.

### **A) Terremoto de Lima 1974 Mw=8.1**

El terremoto del 03 de octubre de 1974 (Mw=8.1) llenó parcialmente un vacío sísmico reconocido por Kelleher (1972). El epicentro estuvo ubicado a 80 km del suroeste de Lima. Produjo un movimiento fuerte del terreno entre 12° y 13.5°S causando un daño considerable ( $I_0 = IX$ ) en muchas partes de Lima metropolitana. Ocurrieron numerosas réplicas, siendo la más importante la ocurrida el 09 de setiembre (Ms=7.1) alrededor de 25km al sur del epicentro principal (Langer y Spence 1995).

### **B) Terremoto de Valparaiso 1985 Mw= 8.0**

Este terremoto ocurrió el 03 de marzo de 1985 en la zona central de Chile, al sur de la ciudad de Valparaiso. Kelleher (1972) había identificado la zona de Valparaiso como una laguna sísmica con potencial de entrar en actividad. Además, el terremoto fue precedido por una fuerte actividad sísmica local 11 días antes. Según los datos y observaciones obtenidas la ruptura de Valparaiso tuvo lugar en dos etapas, una zona de gran deslizamiento de hasta 2m localizada en la zona epicentral de Valparaiso y San Antonio; y una zona de concentración del deslizamiento en la parte sur de la zona epicentral ( Madariaga, 1998).

### **C) Terremoto de Arequipa 2001 Mw= 8.2**

Este terremoto ocurrió el 23 de Junio de 2001 y afectó a los departamentos de Arequipa, Ayacucho, Moquegua y Tacna; así también a las ciudades de Arica e Iquique en Chile, y la Paz en Bolivia. El epicentro estuvo localizado a 82km al nor-oeste de la costa de Arequipa. En los días posteriores al sismo ocurrieron múltiples réplicas, siendo las de mayor magnitud las ocurridas el 25 de junio (Mw=6.8), el 05 de julio (Mw=6.6) y el 7 de julio (Mw=7.5). Estas se ubican frente a las localidades de Ilo y Mollendo, lo que sugiere que la ruptura iniciada por el terremoto del 23 de junio se propagó en dirección sur-este (Tavera et al. 2002).

### **D) Terremoto de Tocopilla 2007**

El terremoto de Tocopilla ocurrió el 14 de Noviembre de 2007 en la región de Antofagasta al norte de Chile. El epicentro, de acuerdo con el estudio de Delouis et al. (2009) estuvo ubicado a 25 km al sur de la ciudad de Tocopilla y 150 km al noreste de la ciudad de Antofagasta; y ocurrió al sur del “gap” sísmico de la interface de subducción al norte de Chile. En las dos semanas posteriores al evento ocurrieron 308 réplicas. La mayor (Mw=6.8) ocurrió 24 horas después del sismo principal. (Delouis et al. 2009)

### **E) Terremoto de Maule 2010 Mw= 8.8**

El 27 de febrero de 2010 ocurrió el terremoto de Maule en el Centro de Chile. Es el quinto terremoto, que se tiene registro, más grande del mundo con una magnitud  $M_w=8.8$ . El epicentro estuvo ubicado aproximadamente a 8km de la costa chilena y el hipocentro a una profundidad de 35 km (Elnashai et al., 2011).

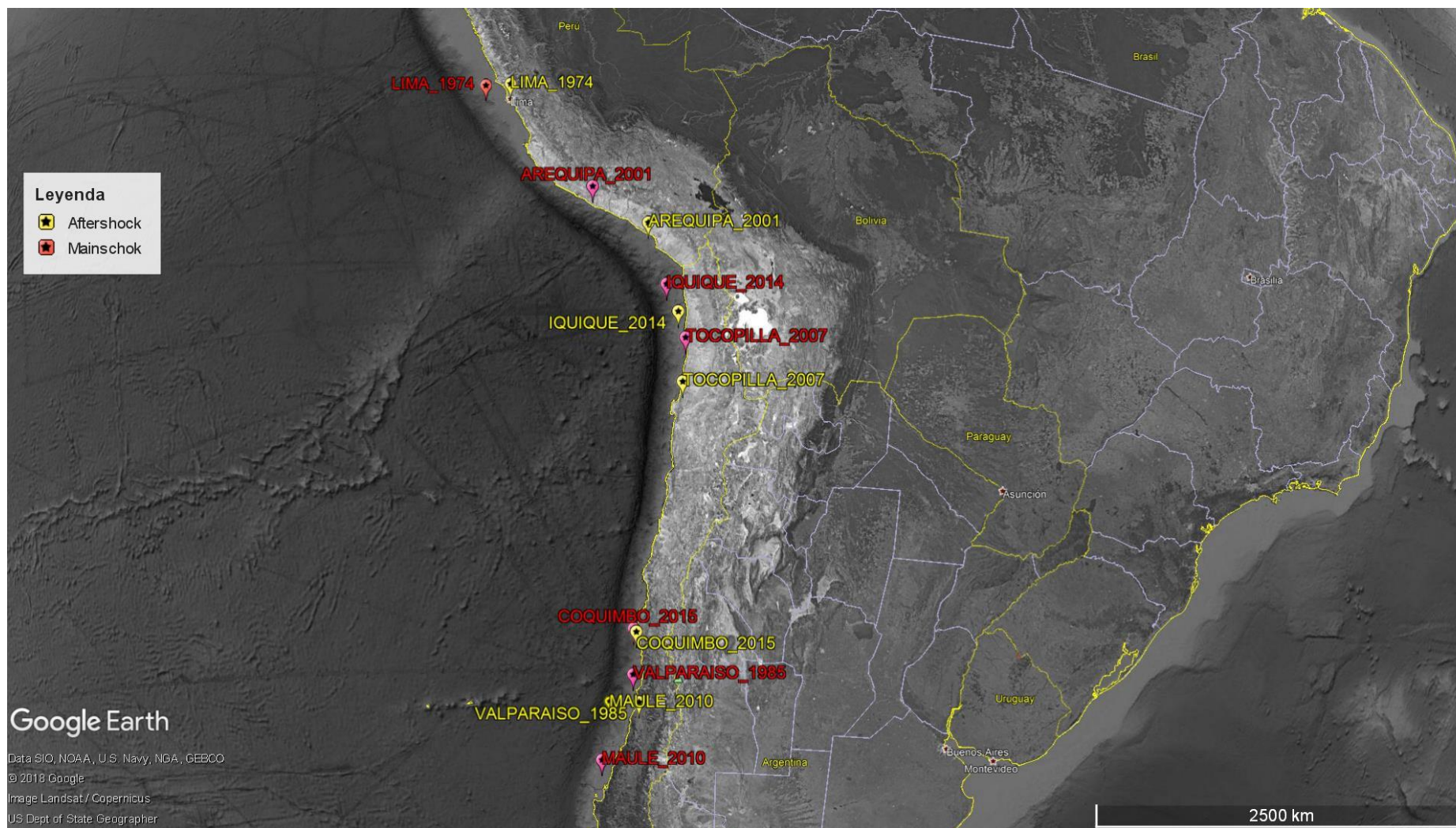
### **F) Terremoto de Iquique 2014 Mw=8.2**

El terremoto de Iquique ocurrió el 01 de abril del 2014 frente a las costas de Iquique y Pisagua al norte de Chile con coordenadas geográficas  $19.572^\circ\text{S}$  y  $70.908^\circ\text{W}$ , y profundidad hipocentral de 38.9 km. Este terremoto fue precedido por un sismo de magnitud 6.7 así como actividad sísmica en los periodos de enero del 2014 y julio-agosto del 2013 (Barrientos 2015).

### **G) Terremoto de Coquimbo 2015 Mw = 8.4**

El terremoto de Coquimbo ocurrió el 16 de septiembre del 2015 frente a las costas de la región de Coquimbo a 37 km al sur oeste de la localidad de Canela Baja con coordenadas epicentrales de  $71.741^\circ\text{W}$  y  $31.637^\circ\text{S}$  a una profundidad de 23 km. Este es el mayor registrado desde el 22 de mayo de 1960 superando al de Iquique en 2014 (Barrientos 2015).





**Figura N°40:** Ubicación de los sismos usados en este estudio y sus réplicas principales.

### 3.3.2.3 AJUSTE ESPECTRAL DE SISMOS PRINCIPALES Y ESCALAMIENTO DE RÉPLICAS

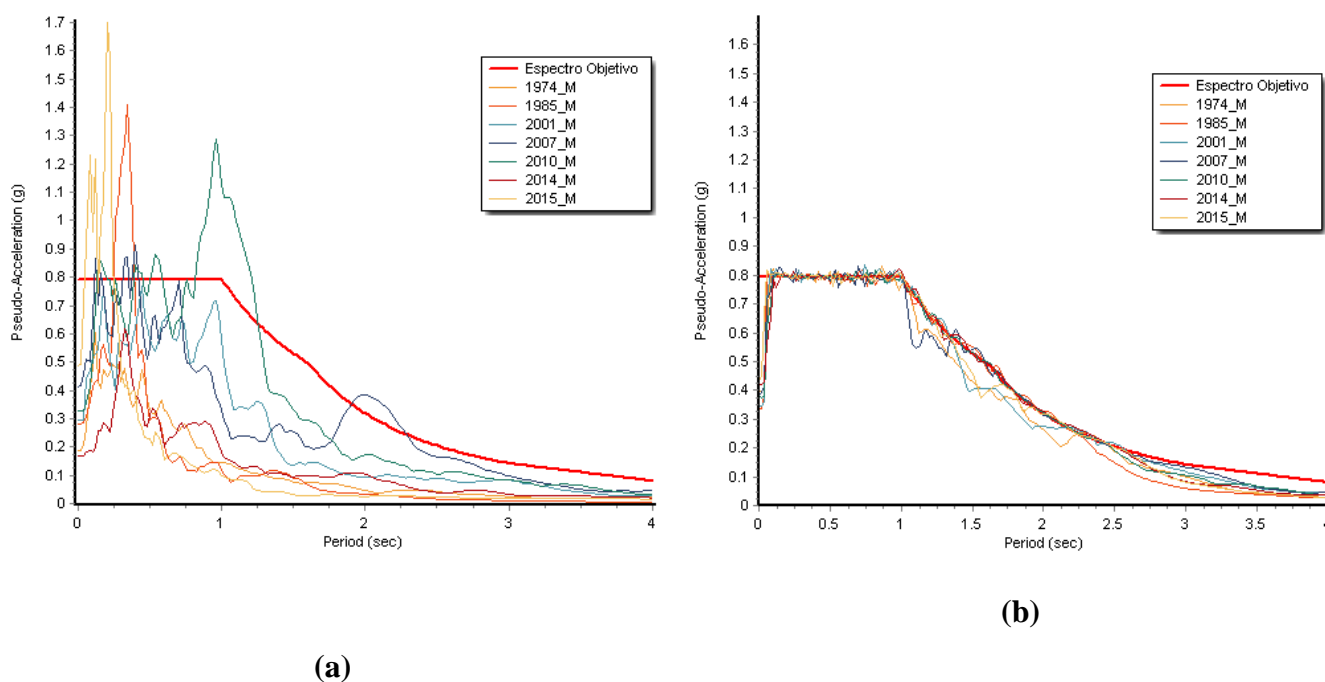
#### A) AJUSTE ESPECTRAL DE SISMOS PRINCIPALES

El registro de aceleraciones de cada sismo principal se han escalado a cada espectro objetivo definidos en el ítem 3.3.2.1 -A por el método de ajuste espectral con dominio en el tiempo a partir del algoritmo de Atik y Abrahamson (2010) implementado en el software Seismomatch.

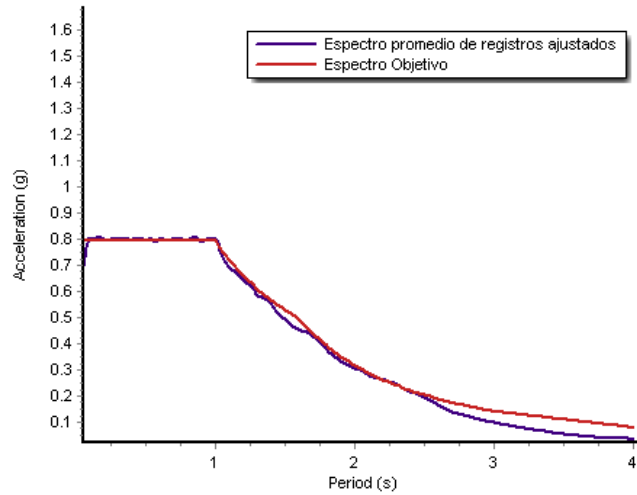
##### A.1 COMPONENTE EW

Se han tomado en cuenta las consideraciones para el ajuste espectral indicados en el ítem 2.2.7.1, se mostrará el proceso para el Sismo Frecuente.

##### A.1.1 SISMO FRECUENTE



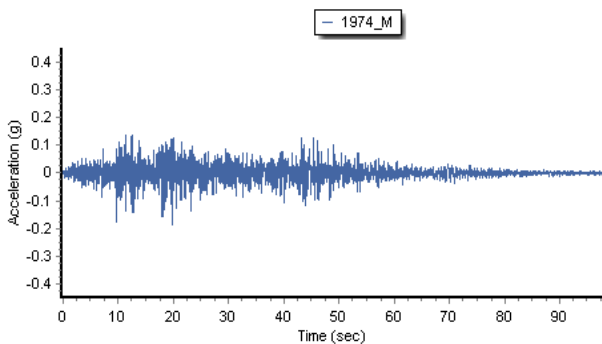
**Figura N°41:** Ajuste Espectral al Sismo Frecuente (componente EW): (a) Espectros de respuesta de sismos originales, (b) Espectros de respuesta de sismos ajustados



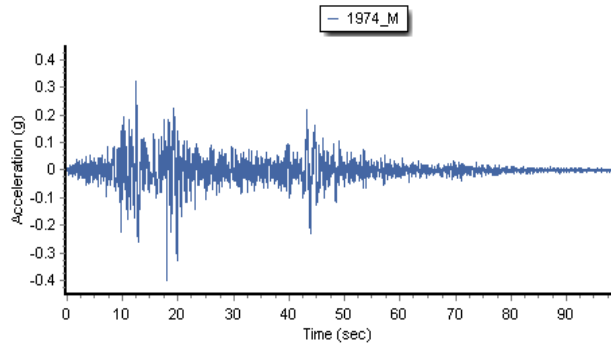
**Figura N°42:** Espectro promedio de registros ajustados (componente EW) y espectro objetivo (sismo frecuente)

De acuerdo a la figura mostrada se ha verificado que el espectro promedio de los registros ajustados cumple con lo indicado con la Norma E.30 Diseño Sismoresistente y el Estándar ASCE-41, es decir que en el rango de periodos entre  $0.2T$  y  $1.5T$  ( $T$ , periodo fundamental) el promedio de los valores espectrales obtenidos para los distintos juegos de registros no sea menor que la ordenada correspondiente al espectro objetivo.

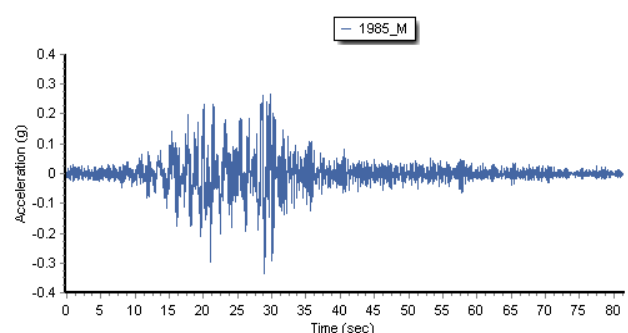
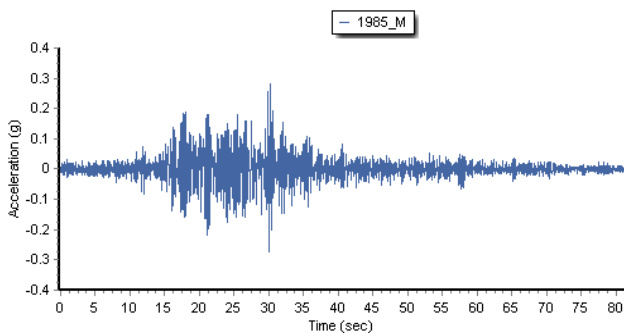
A continuación se muestran los registros sísmicos originales y ajustados espectralmente:



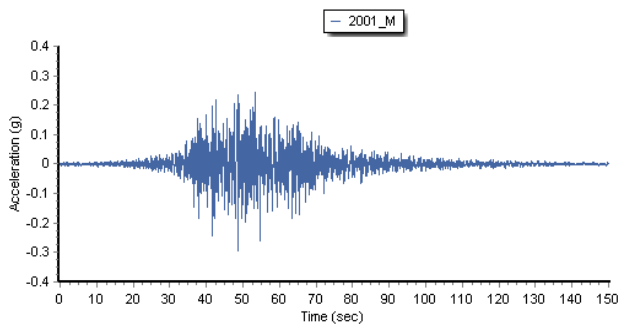
(a) Sismo original



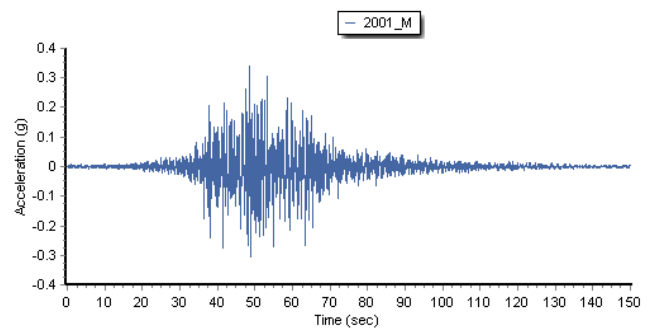
(a) Sismo Ajustado



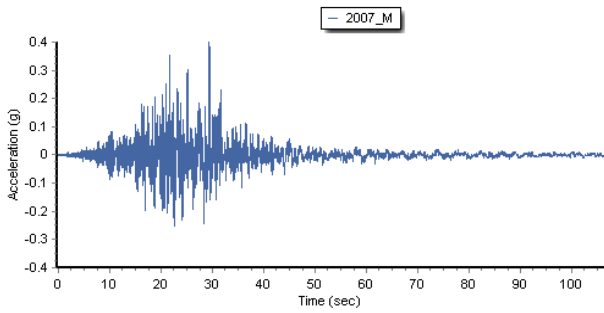
(b) Sismo original



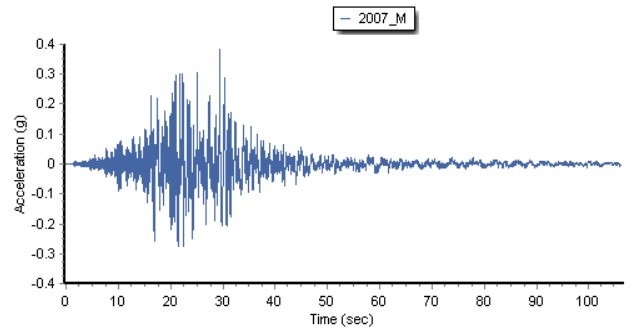
(b) Sismo ajustado



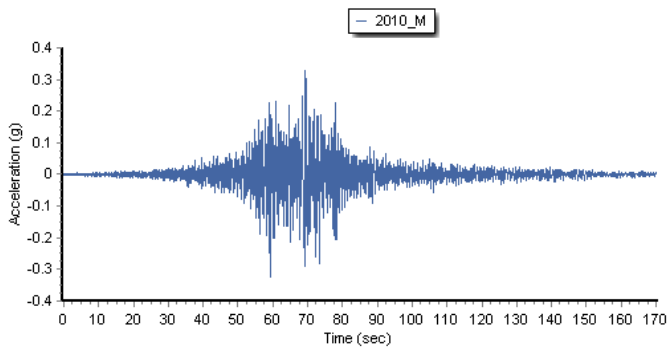
(c) Sismo original



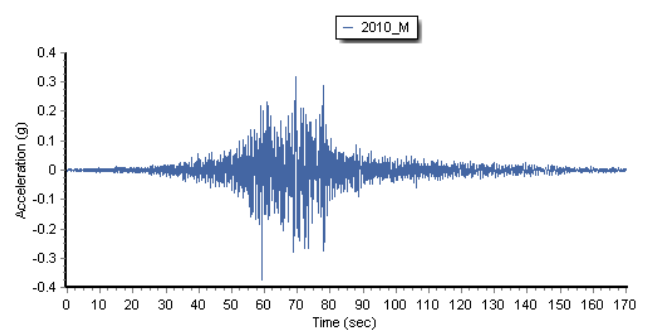
(c) Sismo ajustado



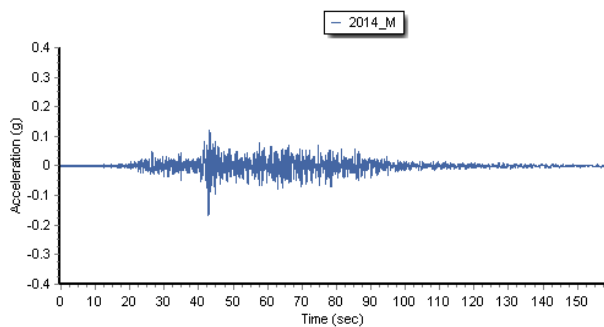
(d) Sismo original



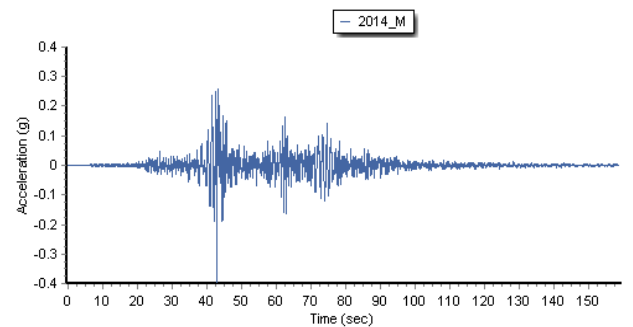
(d) Sismo ajustado



(e) Sismo original



(e) Sismo ajustado

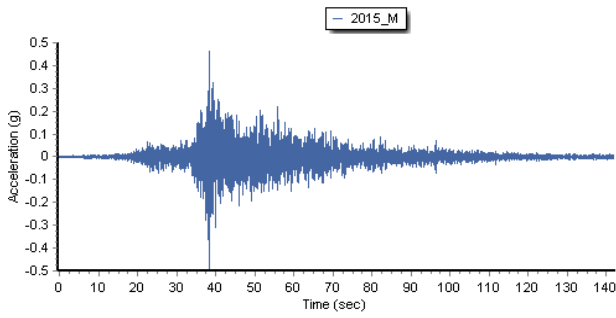


(f) Sismo original

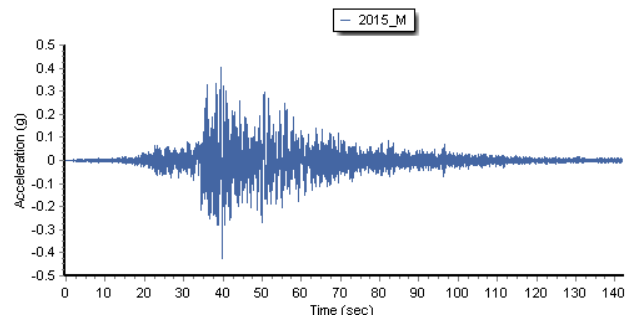
(f) Sismo original

(f) Sismo ajustado

(f) Sismo ajustado



(g) Sismo original



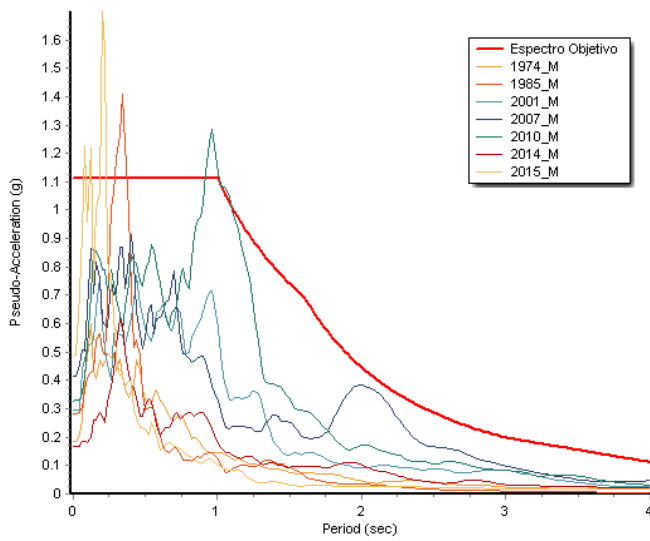
(g) Sismo ajustado

**Figura N°43:** Registros ajustados espectralmente al Sismo Frecuente (Componente EW) : (a) Lima 1974, (b) Valparaíso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015

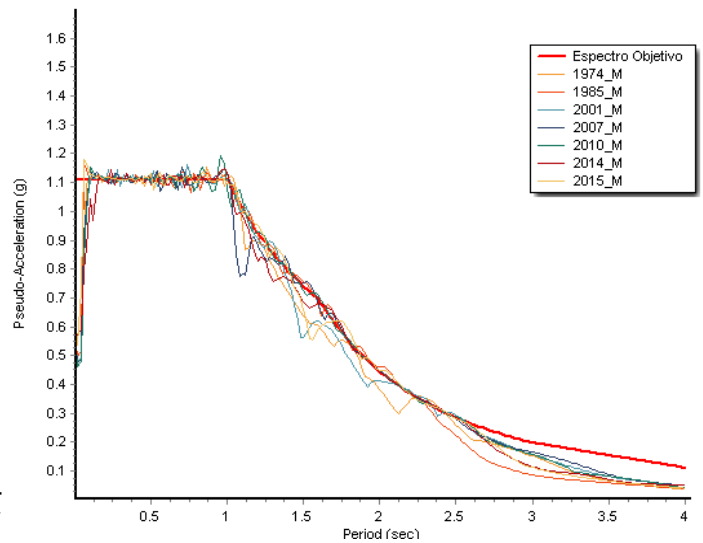
## A.2 COMPONENTE NS

Se han tomado en cuenta las consideraciones para el ajuste espectral indicados en el ítem **2.2.7.1**, se mostrará el proceso para el **Sismo Frecuente**.

### A.1.1 SISMO FRECUENTE

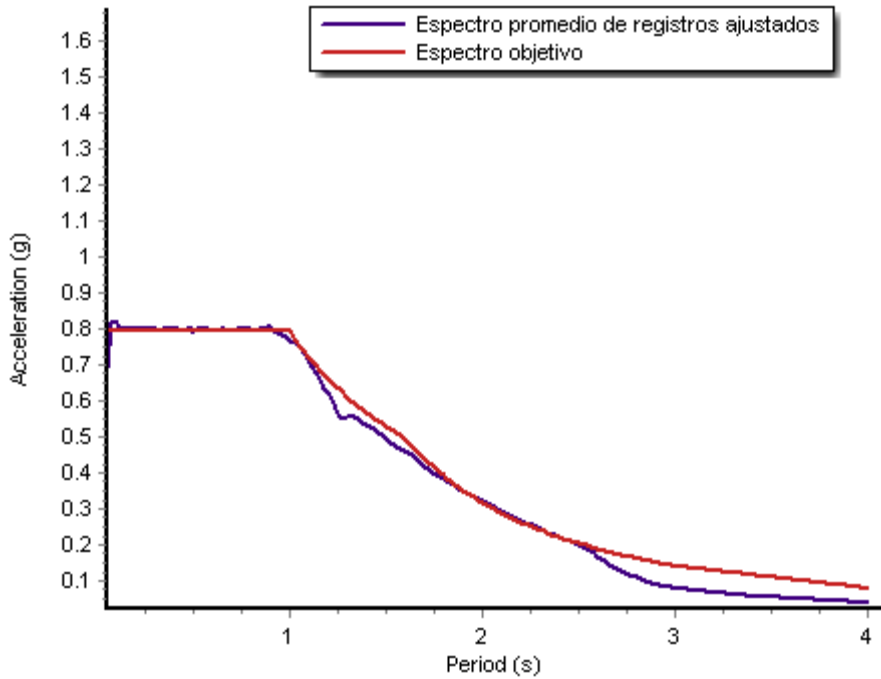


(a)



(b)

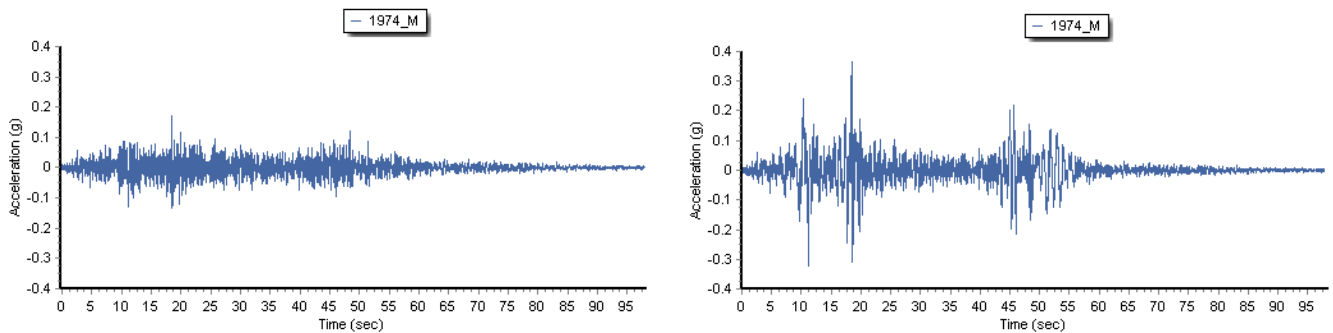
**Figura N°44:** Ajuste Espectral al Sismo Frecuente (componente NS) : (a) Espectros de respuesta de sismos originales, (b) Espectros de respuesta de sismos ajustados



**Figura N°45:** Espectro promedio de registros ajustados (componente NS) y espectro objetivo (sismo frecuente)

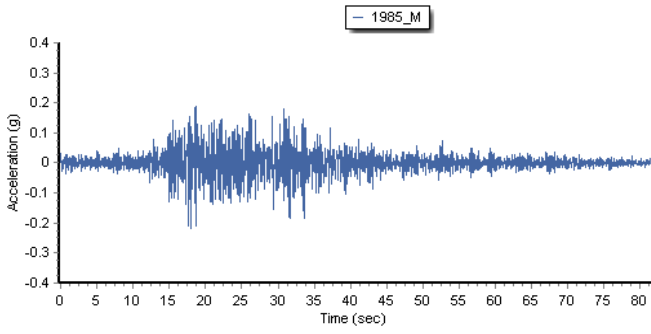
De la misma manera que con el ajuste espectral en la componente EW, se ha verificado que el espectro promedio de los registros ajustados cumple con lo indicado con la Norma E.30 Diseño Sismoresistente y el Estándar ASCE-41, es decir que en el rango de periodos entre  $0.2T$  y  $1.5T$  ( $T$ , periodo fundamental) el promedio de los valores espectrales obtenidos para los distintos juegos de registros no sea menor que la ordenada correspondiente al espectro objetivo.

A continuación se muestran los registros sísmicos originales y ajustados espectralmente:

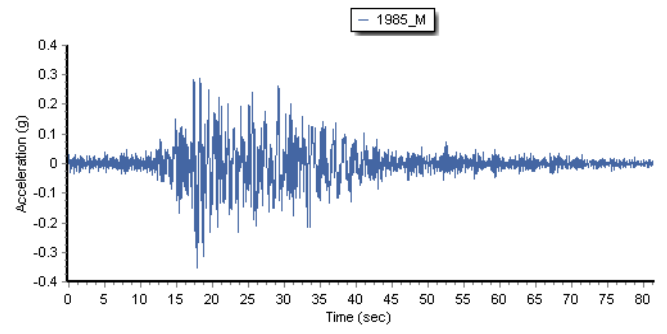


(a) Sismo original

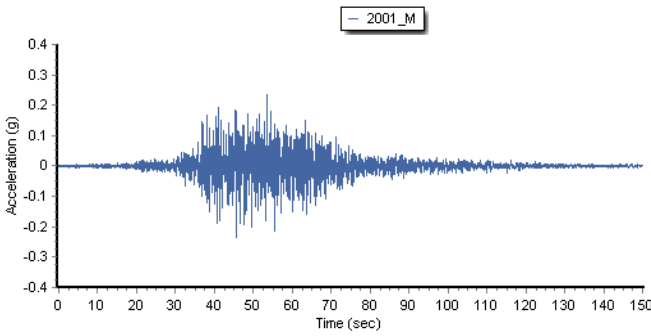
(a) Sismo Ajustado



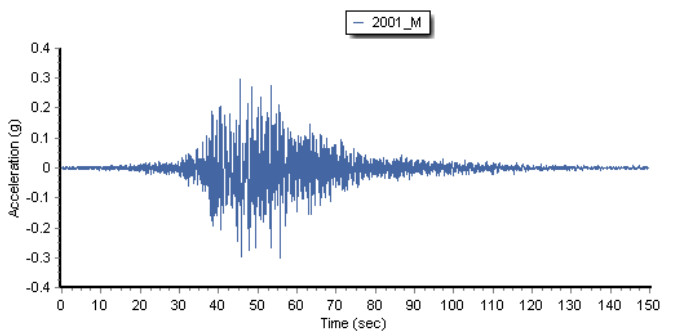
(b) Sismo original



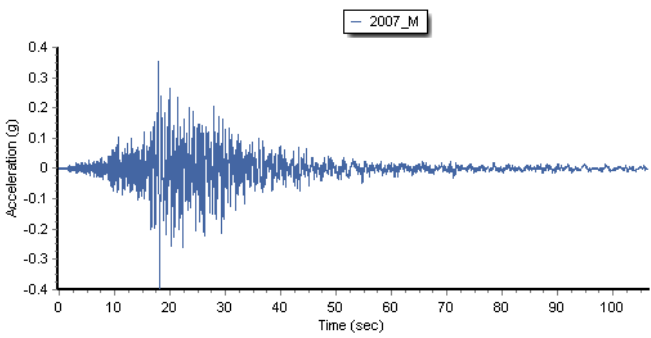
(b) Sismo ajustado



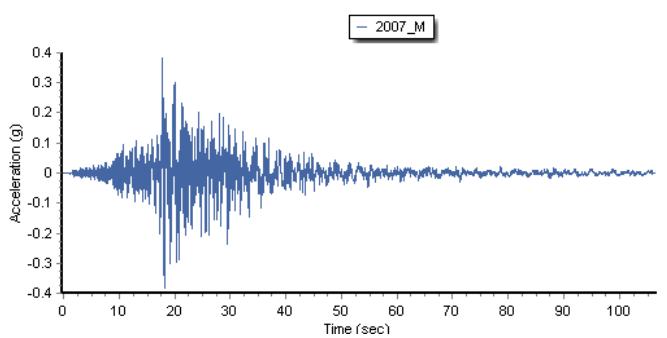
(c) Sismo original



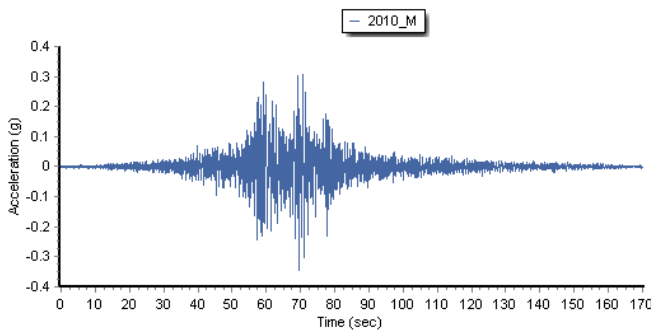
(c) Sismo ajustado



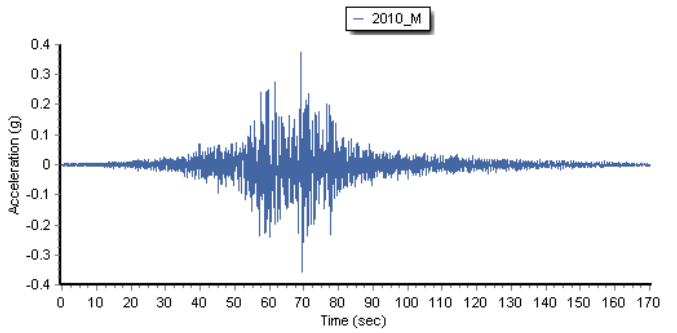
(d) Sismo original



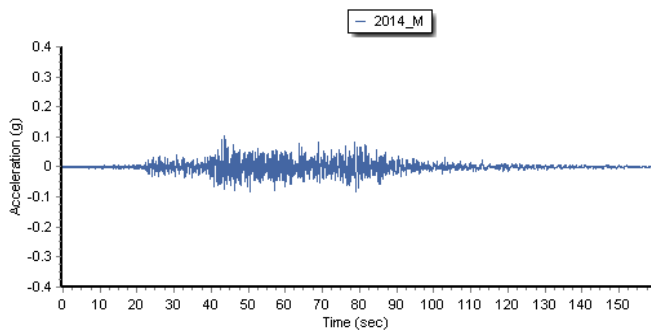
(d) Sismo ajustado



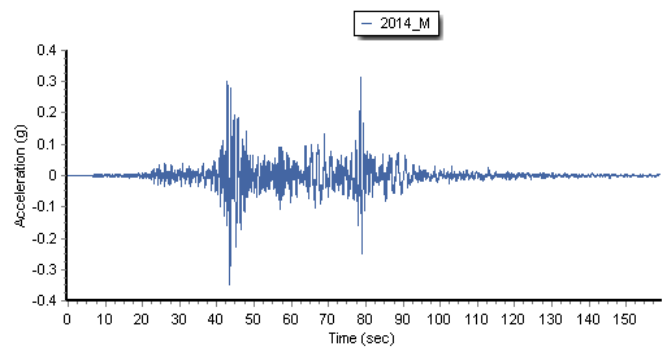
(e) Sismo original



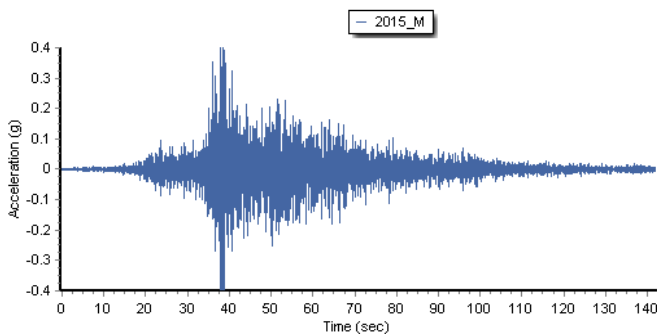
(f) Sismo ajustado



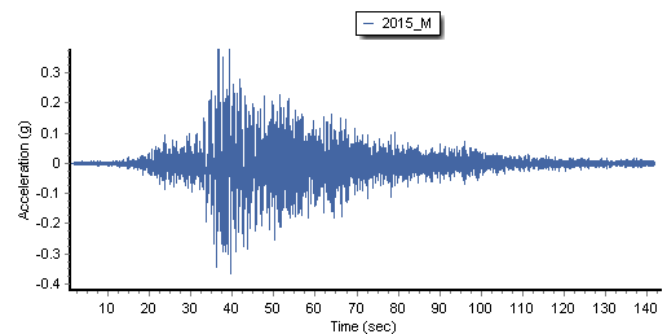
(f) Sismo original



(f) Sismo ajustado



(g) Sismo original



(g) Sismo ajustado

**Figura N°46:** Registros ajustados espectralmente al Sismo Frecuente (Componente EW): (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015

## B) ESCALAMIENTO DE RÉPLICAS

Las réplicas se han escalado respecto a sus registros principales para mantener la relación existente entre sus PGA, de acuerdo a lo indicado en el ítem **2.2.7.3** se ha determinado el factor de escala  $F$ .

### COMPONENTE EW

**Tabla N°12:** Factores de escala “ $F$ ” de réplicas para sismo frecuente (EW)

<i>SISMO PRINCIPAL</i>	$PGA_{MSi}$	$PGA_{MSe}$	$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}}$
Lima 1974	0.19	0.40	2.14
Valparaiso 1985	0.28	0.33	1.19
Arequipa 2001	0.29	0.34	1.16
Tocopilla 2007	0.41	0.39	0.94
Maule 2010	0.33	0.38	1.16
Iquique 2014	0.17	0.42	2.50
Coquimbo 2015	0.49	0.43	0.88



**Tabla N°13:** Factores de escala “F” de réplicas para sismo ocasional (EW)

<i>SISMO PRINCIPAL</i>	$PGA_{MSi}$	$PGA_{MSe}$	$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}}$
Lima 1974	0.19	0.58	3.10
Valparaiso 1985	0.28	0.49	1.75
Arequipa 2001	0.29	0.47	1.61
Tocopilla 2007	0.41	0.48	1.15
Maule 2010	0.33	0.46	1.40
Iquique 2014	0.17	0.57	3.41
Coquimbo 2015	0.49	0.54	1.10

**Tabla N°14:** Factores de escala “F” de réplicas para sismo raro (EW)

<i>SISMO PRINCIPAL</i>	$PGA_{MSi}$	$PGA_{MSe}$	$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}}$
Lima 1974	0.19	0.80	4.27
Valparaiso 1985	0.28	0.66	2.34
Arequipa 2001	0.29	0.67	2.27
Tocopilla 2007	0.41	0.58	1.40
Maule 2010	0.33	0.61	1.87
Iquique 2014	0.17	0.84	5.03
Coquimbo 2015	0.49	0.71	1.46

**Tabla N°15:** Factores de escala “F” de réplicas para sismo muy raro (EW)

<i>SISMO PRINCIPAL</i>	$PGA_{MSi}$	$PGA_{MSe}$	$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}}$
Lima 1974	0.19	1.06	5.67
Valparaiso 1985	0.28	0.85	3.01
Arequipa 2001	0.29	0.81	2.77
Tocopilla 2007	0.41	0.83	2.00
Maule 2010	0.33	0.84	2.57
Iquique 2014	0.17	1.17	6.99
Coquimbo 2015	0.49	0.82	1.68

## COMPONENTE NS

**Tabla N°16:** Factores de escala “F” de réplicas para sismo frecuente (NS)

<i>SISMO PRINCIPAL</i>	$PGA_{MSi}$	$PGA_{MSe}$	$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}}$
Lima 1974	0.17	0.37	2.14
Valparaiso 1985	0.22	0.35	1.63
Arequipa 2001	0.23	0.30	1.27
Tocopilla 2007	0.45	0.38	0.85
Maule 2010	0.35	0.38	1.08
Iquique 2014	0.11	0.35	3.32
Coquimbo 2015	0.47	0.44	0.93

**Tabla N°17:** Factores de escala “F” de réplicas para sismo ocasional (NS)

<i>SISMO PRINCIPAL</i>	$PGA_{MSi}$	$PGA_{MSe}$	$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}}$
Lima 1974	0.17	0.55	3.20
Valparaiso 1985	0.22	0.45	2.10
Arequipa 2001	0.23	0.41	1.74
Tocopilla 2007	0.45	0.58	1.27
Maule 2010	0.35	0.49	1.40
Iquique 2014	0.11	0.51	4.88
Coquimbo 2015	0.47	0.55	1.16

**Tabla N°18:** Factores de escala “F” de réplicas para sismo raro (NS)

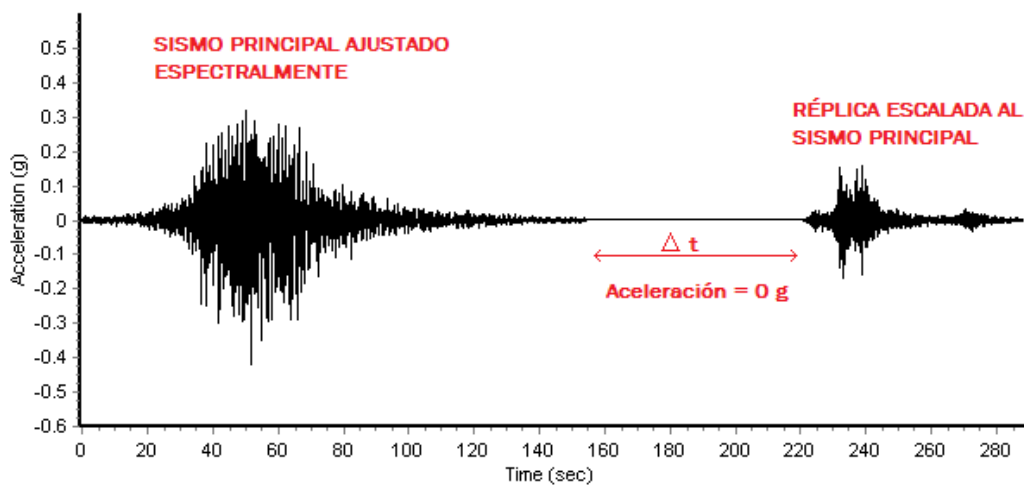
<i>SISMO PRINCIPAL</i>	$PGA_{MSi}$	$PGA_{MSe}$	$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}}$
Lima 1974	0.17	0.76	4.48
Valparaiso 1985	0.22	0.71	3.28
Arequipa 2001	0.23	0.58	2.45
Tocopilla 2007	0.45	0.77	1.70
Maule 2010	0.35	0.67	1.93
Iquique 2014	0.11	0.77	7.35
Coquimbo 2015	0.47	0.72	1.54

**Tabla N°19:** Factores de escala “F” de réplicas para sismo muy raro (NS)

<i>SISMO PRINCIPAL</i>	$PGA_{MSi}$	$PGA_{MSe}$	$F = \frac{PGA_{MSe}}{PGA_{MSi}}$
Lima 1974	0.17	0.99	5.81
Valparaiso 1985	0.22	0.95	4.39
Arequipa 2001	0.23	0.77	3.26
Tocopilla 2007	0.45	1.04	2.29
Maule 2010	0.35	0.75	2.18
Iquique 2014	0.11	0.99	9.42
Coquimbo 2015	0.47	0.92	1.95

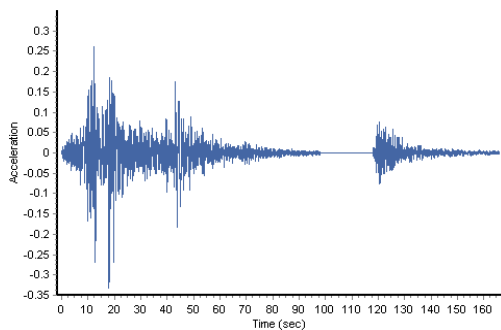
### C) CONFORMACIÓN DE REGISTROS PARA LA EVALUACIÓN SÍSMICA

La conformación de acelerogramas para la evaluación sísmica se ha realizado uniendo los registros de cada sismo principal ajustado espectralmente, con su correspondiente registro de réplica escalado respecto a este con los factores obtenidos en el ítem anterior. Para el ensamblaje de esta secuencia de sismos se ha considerado un lapso de tiempo 20 segundos con valor de aceleración igual a cero que de acuerdo con en Huang y Qian (2012) es considerado suficiente para cesar el movimiento de la estructura debido al amortiguamiento.

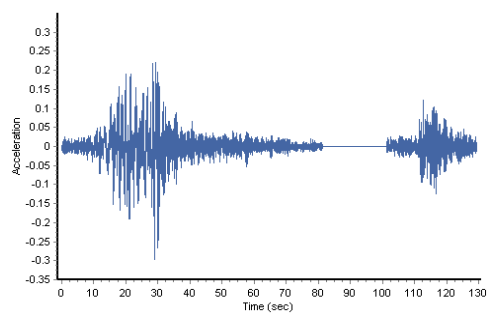


**Figura N°47:** Esquema para la conformación de secuencias de sismos principales y réplicas con un silencio de aceleración  $\Delta t$  igual a 20 segundos.

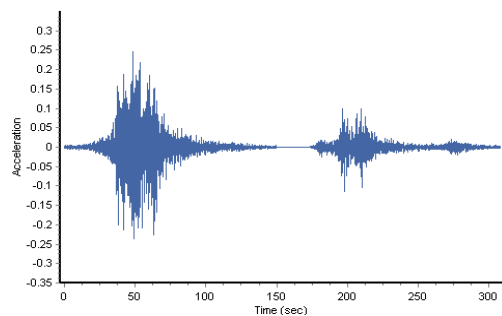
A continuación se muestran las secuencias de sismos y réplicas conformadas para un nivel de peligro sísmico de Sismo Frecuente (componente EW) y Sismo Ocasional (componente NS), los registros para todos los niveles de peligro se muestran en el Anexo 02.



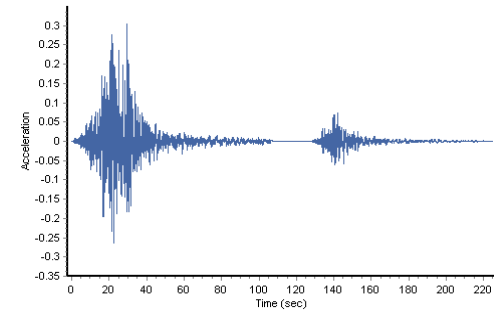
(a)



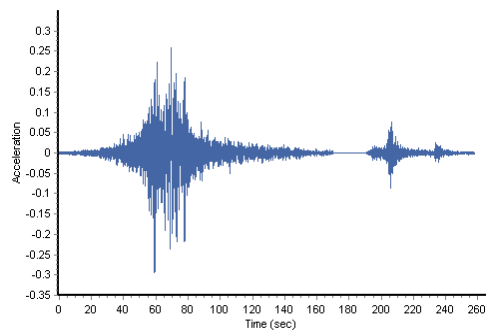
(b)



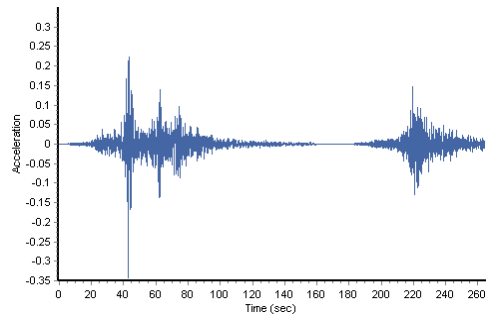
(c)



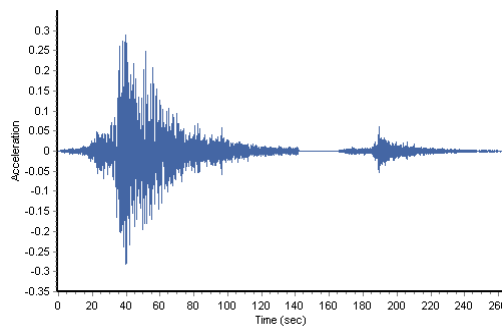
(d)



(e)

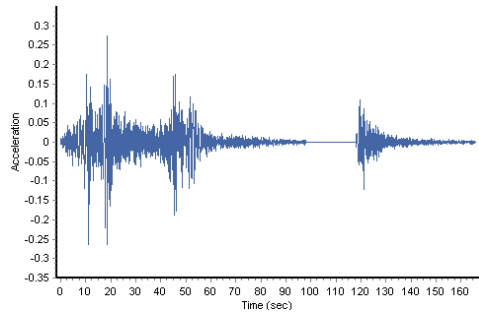


(f)

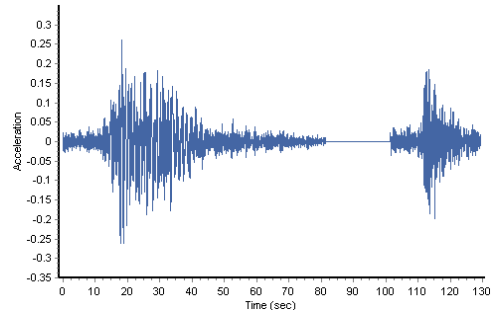


(g)

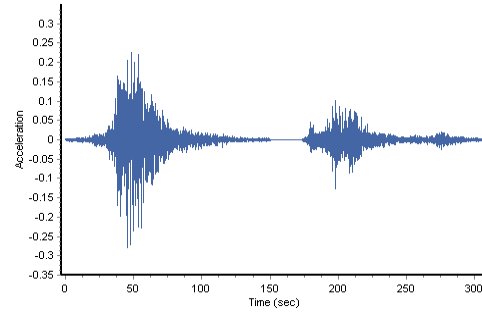
**Figura N°48:** Secuencias de sismos y réplicas Componente EW (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo frecuente) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocoilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015



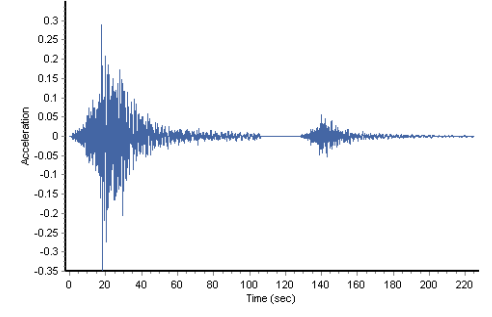
(a)



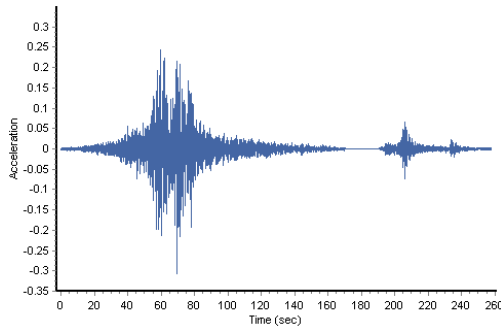
(b)



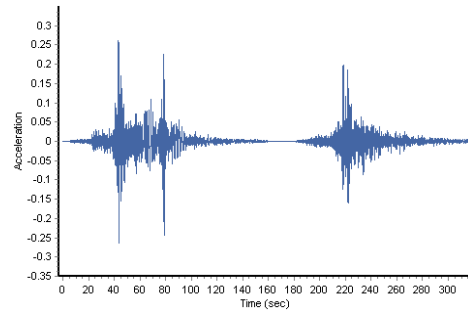
(c)



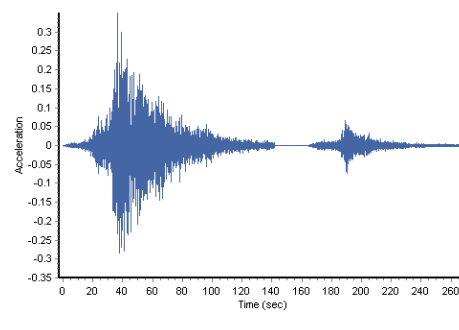
(d)



(e)



(f)



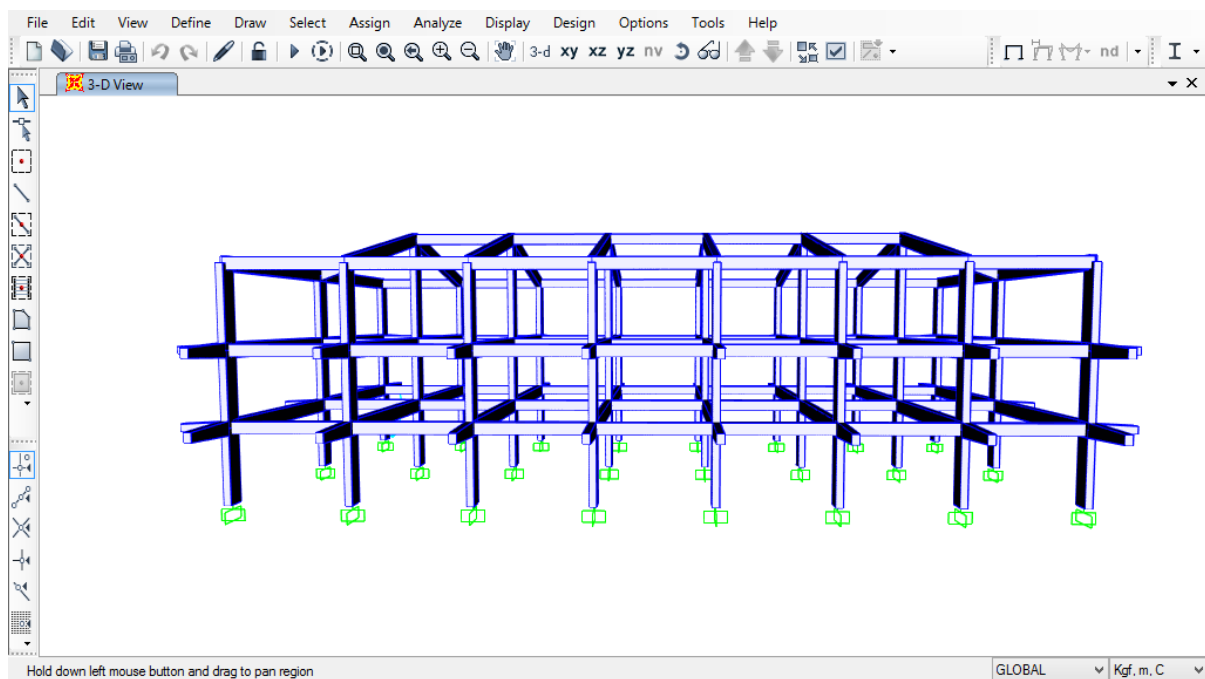
(g)

**Figura N°49:** Secuencias de sismos y réplicas Componente NS (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo frecuente) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocoilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015

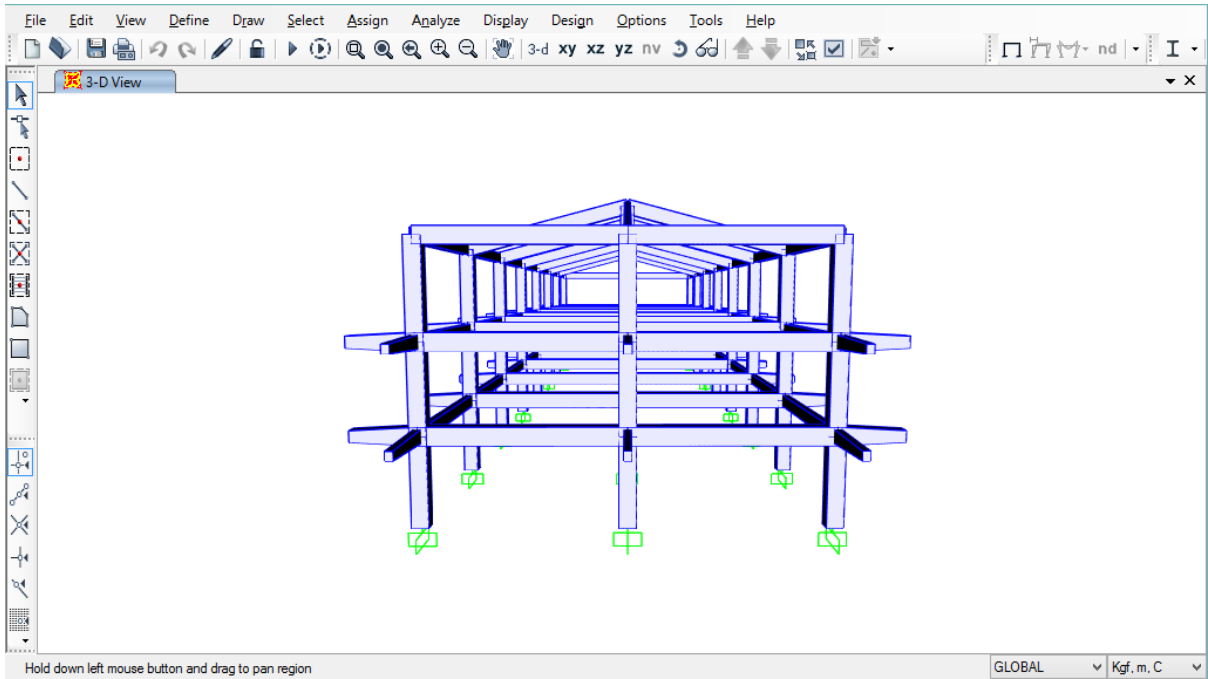
### 3.3.3 MODELOS COMPUTACIONALES DE LAS EDIFICACIONES

#### 3.3.3.1 MODELOS COMPUTACIONALES EN SAP2000

La elaboración de un modelo computacional para una evaluación sísmica debe tener en cuenta una caracterización adecuada de la no linealidad de los materiales y el comportamiento estructural. Además se debe tener un entendimiento racional entre el nivel de precisión del análisis y el tiempo computacional requerido para completarlo. Los modelos computacionales de los edificios 2H y 4F fueron inicialmente desarrollados en SAP2000. Estos fueron tomados como estructuras porticadas sin considerar los efectos de interacción con los componentes no estructurales. Su construcción fue realizada a partir de elementos “frame” de acuerdo a los datos obtenidos de los planos de ambos proyectos, los estudios hechos por Orrillo (2014) y Bolaños (2015), e inspecciones visuales a las edificaciones.

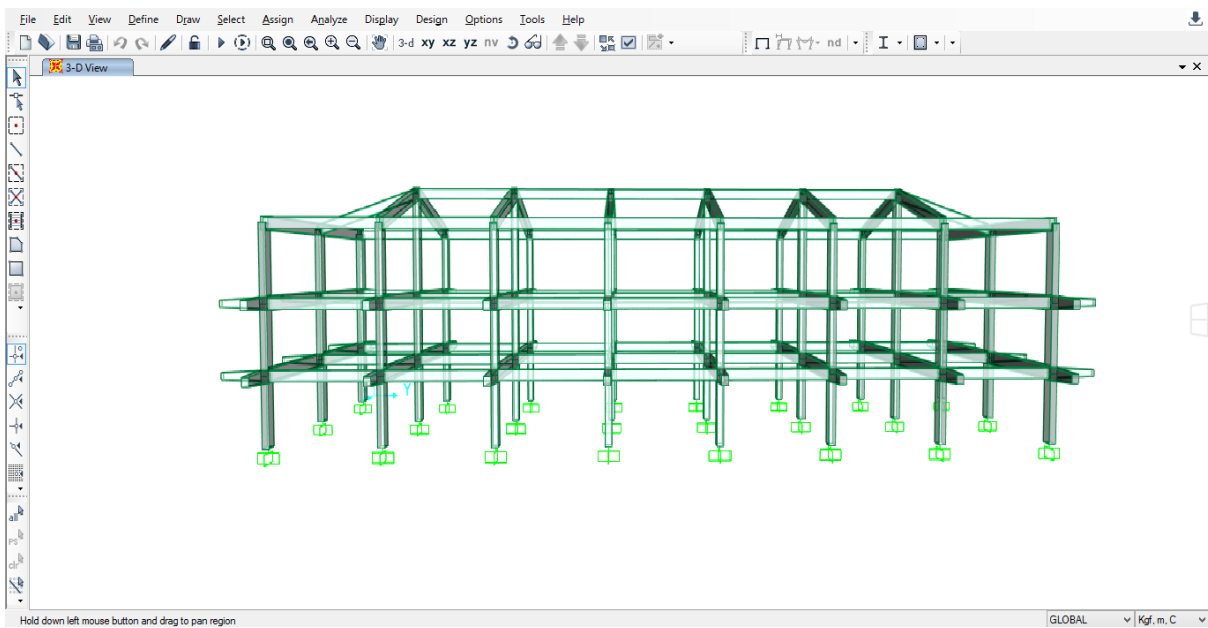


(a)

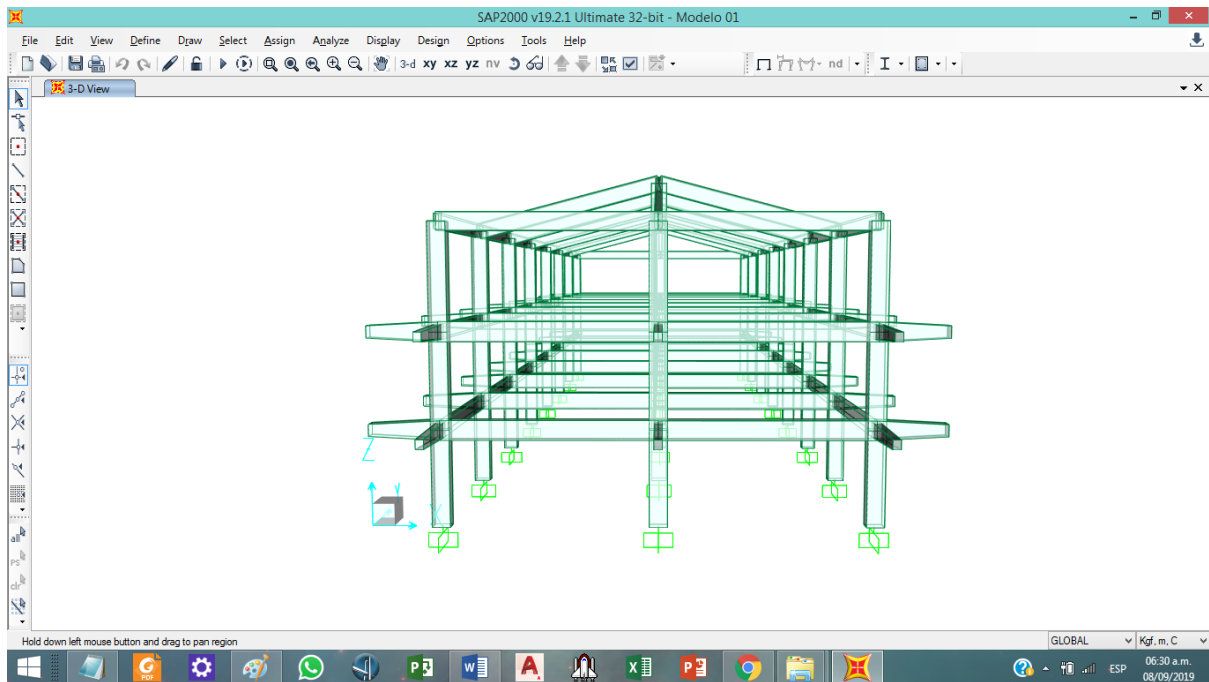


(b)

**Figura N°50:** Modelo computacional de edificio 2H desarrollado en SAP2000: (a) vista lateral, (b) vista frontal



(a)



(b)

**Figura N°51:** Modelo computacional de edificio 4F desarrollado en SAP2000: (a) vista lateral, (b) vista frontal

### 3.3.3.1 MODELOS COMPUTACIONALES EN PERFORM 3D

Los edificios 2H y 4F fueron modelados en PERFORM 3D a partir de los modelos realizados en SAP2000. PERFORM-3D es un software especializado para la evaluación por desempeño de estructuras y el dimensionamiento sísmico basado en desplazamientos. Este permite el monitoreo del comportamiento inelástico de los componentes estructurales con diferentes niveles de deformación (Mamun y Saatcioglu 2017).

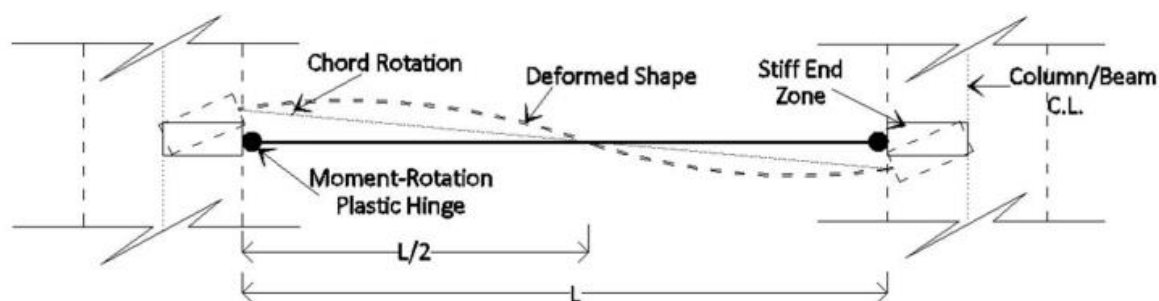
De la misma manera que en SAP2000, fueron tomados como estructuras porticadas sin considerar los efectos de interacción con los componentes no estructurales. Fueron asignados diafragmas para simular un comportamiento rígido de los entrepisos



## A) MODELO DE VIGAS Y COLUMNAS

De acuerdo con Rezaei y Massumi (2014) se ha asumido que los elementos de los pórticos resisten principalmente el momento flector y las relaciones fuerza-deformación son controladas por elasticidad y plasticidad en flexión. Las vigas con nula fuerza axial actuante e insignificante comportamiento biaxial, mientras que las columnas resistentes fuerza axial y pandeo biaxial.

Las vigas fueron modeladas como elementos “Fema beam concrete type” a partir del modelo “chord rotation” definidos en FEMA 356 y propuestos en Perform3D. En este modelo, cada miembro está compuesto de dos segmentos idealizado con un elemento viga elástico y una rótula plástica.



**Figura N°52:** Modelo analítico de vigas y columnas usados en PERFORM-3D

**Fuente:** Tomado de Mamum y Saatcioglu (2017)

El comportamiento plástico se ha definido de las relaciones de histéresis (fuerza-desplazamiento) para cada elemento. En vigas, se ha considerado un modelo de tipo “trilinear” con una pendiente elástica de  $6EI/L$  ( $L$  es la longitud de la viga). Los parámetros para la caracterización de este modelo se han obtenido mediante análisis seccional en SAP2000 con la herramienta Section Designer. Donde se ha determinado la fluencia inicial  $FY$ , la resistencia última  $FU$  (previa a la pérdida de resistencia) y los valores de las rotaciones plásticas en el punto de última resistencia  $\theta_u$  ( $U$ ) y en el punto límite de deformación  $\theta_x$  ( $X$ ).

Por otro lado, no se ha considerado pérdida repentina de la resistencia de los elementos, debido a que se espera una degradación continua en su capacidad estructural, que es lo que ocurre en la mayoría de los casos observados.

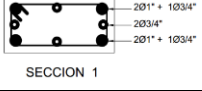

**Tabla N°20: Parámetros para los modelos de vigas en edificio 2H**

		D (m)	FY (Kg/m2)	FU (Kg/m2)	Øx	Øu	Curv X (1/m)
V_50X25_S1		0.44	11391	18759.73	0.046	0.041	0.1859
V_65X30_S2		0.59	20751	35490	0.060	0.054	0.184
V_65X30_S4		0.59	20664	35515	0.060	0.054	0.1842
V_65X30_S5		0.59	27832	48939	0.061	0.055	0.1875
V_65X30_S7		0.59	23162	40485	0.060	0.054	0.1846
V_65X30_S8		0.59	23221	40369	0.054	0.048	0.1641
V_50X25_S1		0.44	9160	14918	0.057	0.051	0.233
V_50X25_S2		0.44	6351	10080	0.056	0.051	0.229

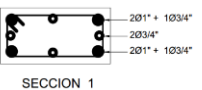
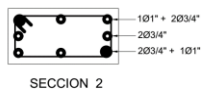
**Tabla N°21: Parámetros para los modelos de vigas en edificio 4F**

		D (m)	FY (Kg/m2)	FU (Kg/m2)	Øx	Øu	Curv X (1/m)
V_60X25_S1		0.54	11391	18760	0.056	0.050	0.186
V_65X30_S2		0.59	22860	39088	0.055	0.049	0.167
V_65X30_S4		0.59	22761	39104	0.055	0.049	0.167
V_65X30_S5		0.59	30697	54054	0.055	0.050	0.169
V_65X30_S7		0.59	23903	41706	0.055	0.049	0.167
V_65X30_S8		0.59	24066	41629	0.055	0.049	0.167
V_50X25_S1		0.44	9219	15032	0.057	0.051	0.233
V_50X25_S2		0.44	6396	10119	0.056	0.051	0.229

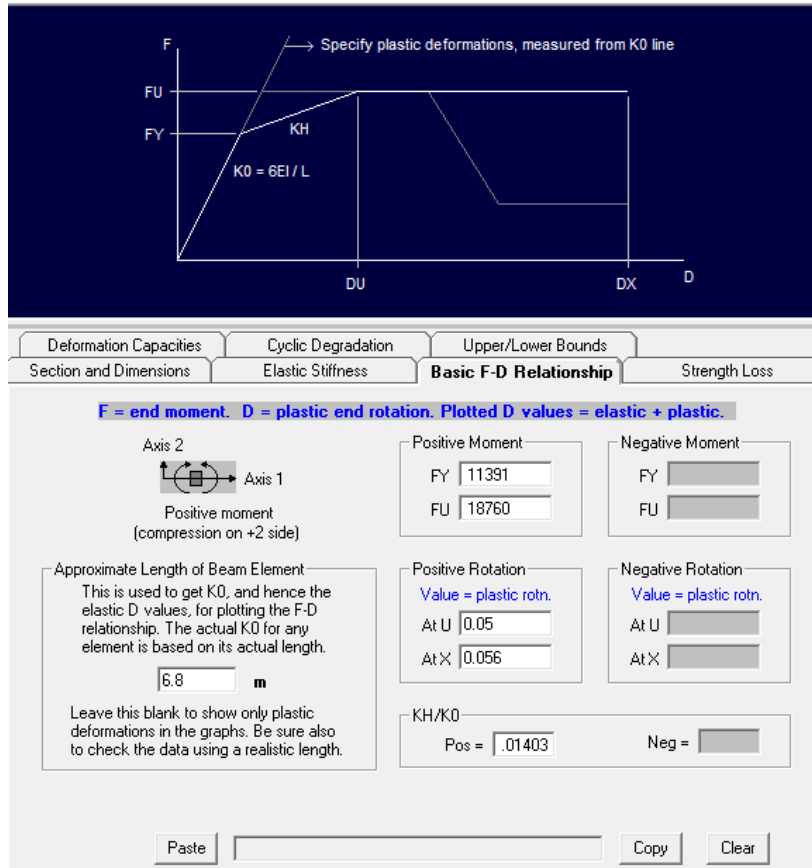
**Tabla N°22:** Parámetros para los modelos de columnas en edificio 2H

	Tensión (PT) kg	Compresión (PC) kg	Punto de Balance kg	Momento 1-3 kg-m	Momento 1-2 kg-m	$\Theta_x$	$\Theta_u$	Curv X (1/m)
<p>S1</p>  <p>SECCION 1</p>	131134	329100	133316	47987	19953	0.065	0.058	0.236
<p>S2</p>  <p>SECCION 2</p>	114348	314494	114348	42985	17234	0.067	0.060	0.221

**Tabla N°23:** Parámetros para los modelos de columnas en edificio 4F

	Tensión (PT) kg	Compresión (PC) kg	Punto de Balance kg	Momento 1-3 kg-m	Momento 1-2 kg-m	$\Theta_x$	$\Theta_u$	Curv X (1/m)
<p>S1</p>  <p>SECCION 1</p>	133316	305051	117851	45180	19060	0.062	0.056	0.207
<p>S2</p>  <p>SECCION 2</p>	114348	290384	117863	40749	17523	0.064	0.057	0.221

Las columnas fueron modeladas a partir de elementos con rótulas plásticas en sus extremos: “P-M2-M3 Hinge concrete rotation” disponibles en Perform3D con interacción entre la fuerza axial y flexión en las dos direcciones ortogonales de análisis; y un elemento elástico en su centro. Se han modelado empotradas en la base y considerando una unión rígida con las vigas. Se ha tomado un modelo e-p-p (elastoplástico perfecto) para reducir la complejidad y la incertidumbre el modelo de su comportamiento plástico.



**Figura N°53:** Ejemplo de definición de los parámetros de fuerza deformación en un modelo trilinear de vigas en PERFORM 3D

Para definir las relaciones fuerza-deformación en columnas se ha tomado en cuenta los diagramas de interacción en cada dirección de análisis. Estos han sido realizados por medio de análisis seccional en Sap2000, con la herramienta Section Designer. Donde se ha determinado las fuerzas axiales en tensión y compresión, la fuerza de balance con sus correspondientes momentos actuantes en las dos direcciones de análisis y las deformaciones máximas.

Stiffness, Dimensions	Inelastic Strength	Elastic Strength																												
You can use these strengths for inelastic components such as hinges.																														
<b>Axial/Bending</b>	Shear	Torsion																												
Strength at U Point <input checked="" type="radio"/> Yes <input type="radio"/> No																														
<table border="0"> <tr> <td colspan="2">Axial Forces</td> <td colspan="2">Moments at Balance Point (MB)</td> </tr> <tr> <td>Tension (PT)</td> <td><input type="text" value="133320"/></td> <td>Axis 2 (1-3 plane)</td> <td><input type="text" value="47407"/></td> </tr> <tr> <td>Compression (PC)</td> <td><input type="text" value="329100"/></td> <td>Axis 3 (1-2 plane)</td> <td><input type="text" value="20155"/></td> </tr> <tr> <td>Balance point (PB)</td> <td><input type="text" value="131130"/></td> <td>At 45 degrees (optional - for checking yield surface)</td> <td><input type="text" value="0"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Moments at P = 0 (optional - for checking yield surface)</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Axis 2 (1-3 plane)</td> <td><input type="text" value="0"/></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>Axis 3 (1-2 plane)</td> <td><input type="text" value="0"/></td> </tr> </table>			Axial Forces		Moments at Balance Point (MB)		Tension (PT)	<input type="text" value="133320"/>	Axis 2 (1-3 plane)	<input type="text" value="47407"/>	Compression (PC)	<input type="text" value="329100"/>	Axis 3 (1-2 plane)	<input type="text" value="20155"/>	Balance point (PB)	<input type="text" value="131130"/>	At 45 degrees (optional - for checking yield surface)	<input type="text" value="0"/>			Moments at P = 0 (optional - for checking yield surface)				Axis 2 (1-3 plane)	<input type="text" value="0"/>			Axis 3 (1-2 plane)	<input type="text" value="0"/>
Axial Forces		Moments at Balance Point (MB)																												
Tension (PT)	<input type="text" value="133320"/>	Axis 2 (1-3 plane)	<input type="text" value="47407"/>																											
Compression (PC)	<input type="text" value="329100"/>	Axis 3 (1-2 plane)	<input type="text" value="20155"/>																											
Balance point (PB)	<input type="text" value="131130"/>	At 45 degrees (optional - for checking yield surface)	<input type="text" value="0"/>																											
		Moments at P = 0 (optional - for checking yield surface)																												
		Axis 2 (1-3 plane)	<input type="text" value="0"/>																											
		Axis 3 (1-2 plane)	<input type="text" value="0"/>																											
Shape of P-M2-M3 Yield Surface																														
P exponent, Alpha, for P-M interaction																														
PB to PC vs. M2	<input type="text" value="2"/>	PB to PC vs. M3	<input type="text" value="2"/>																											
PB to PT vs. M2	<input type="text" value="2"/>	PB to PT vs. M3	<input type="text" value="2"/>																											
Min 1.5, Max 3.0, Suggested = 2.0																														
M exponent, Beta, for P-M interaction <input type="text" value="1.1"/>																														
Min 1.1, Max 3.0, Suggested = 1.1																														
M exponent, Gamma, for M-M interaction <input type="text" value="1.4"/>																														
Min 1.1, Max 3.0, Suggested = 1.4																														
<input checked="" type="radio"/> P-M2-M3 <input type="radio"/> M2-M3 <input type="button" value="Close Plot"/>																														

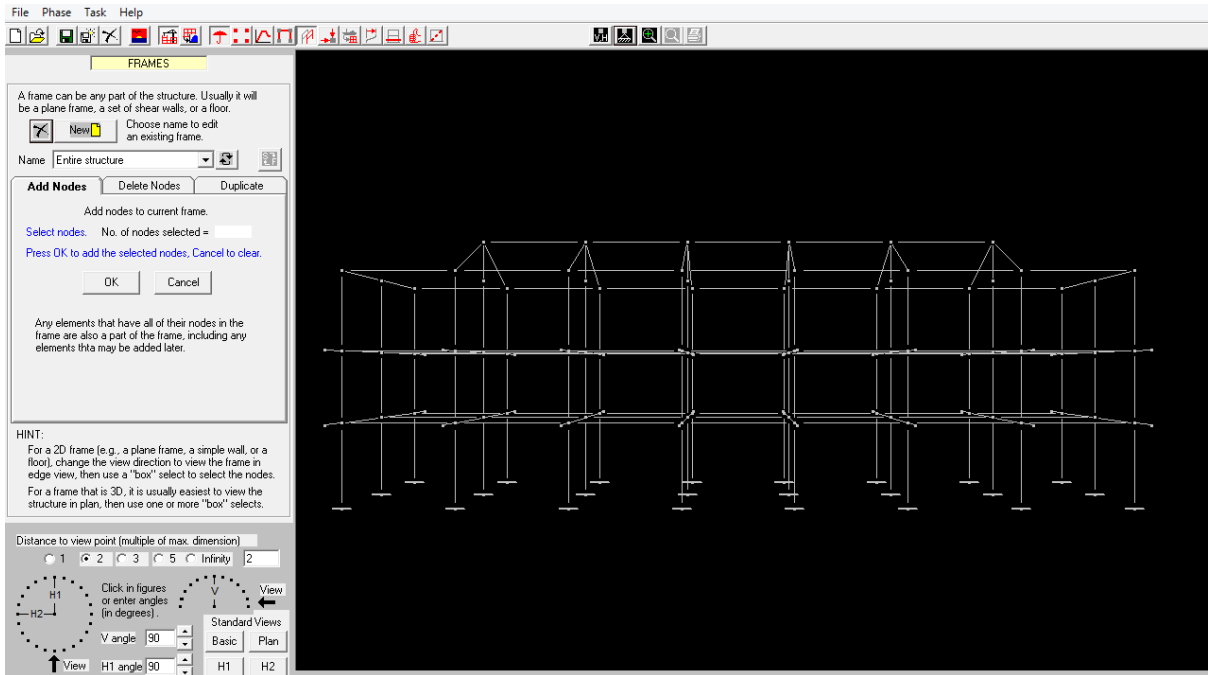
(a)

**Figura N°54:** Ejemplo de definición de los parámetros de fuerza deformación (Columna C-1) en un modelo e-p-p de columnas en PERFORM 3D

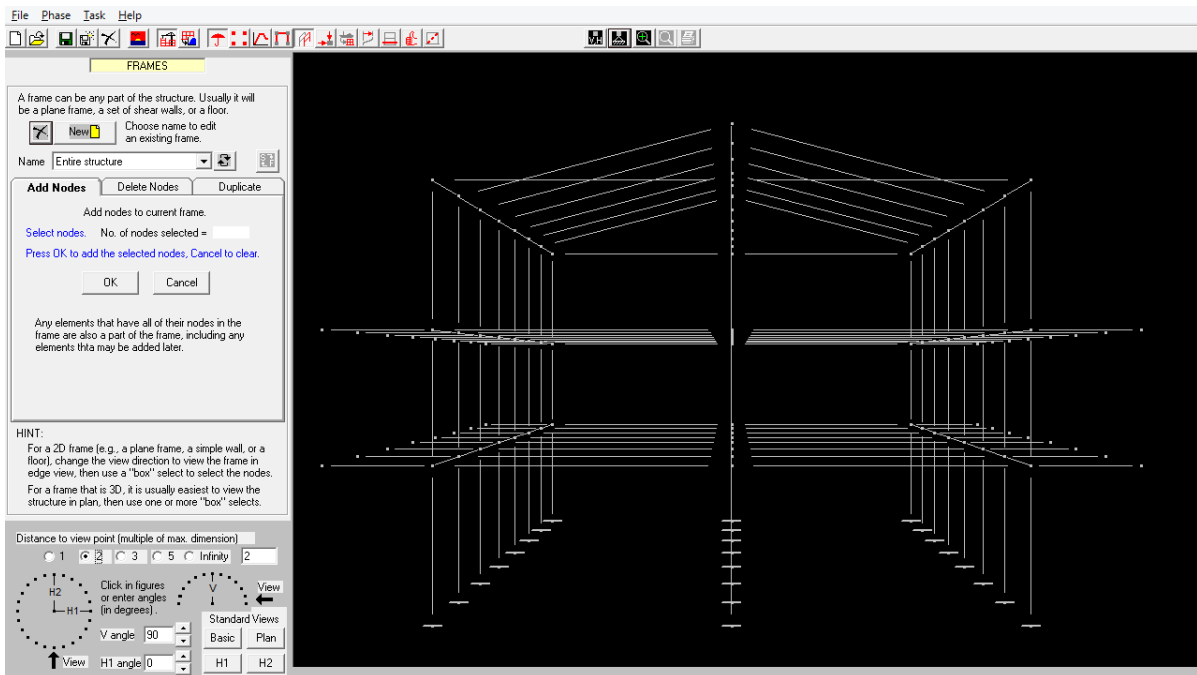
La degradación de rigidez que ocurre en los ciclos de carga y descarga fue modelada para vigas y columnas por medio de factores de degradación de energía. Para esta investigación se usaron los factores usados en Huang y Qian (2012):  $Y=1$ ,  $U=0.9$ ,  $L=0.7$ ,  $R=0.4$  y  $X=0.3$ .

Section and Dimensions	Elastic Stiffness	Basic F-D Relationship	Strength Loss
Deformation Capacities	<b>Cyclic Degradation</b>	Upper/Lower Bounds	
<b>Deformation values = plastic rotations</b>			
For Positive Deformations		For Negative Deformations	
Point	Deformation	Energy Factor	Point
Y		<input type="text" value="1"/>	Y
1	<input type="text" value="0.01"/>	<input type="text" value="0.75"/>	1
2	<input type="text" value="0.02"/>	<input type="text" value="0.7"/>	2
3	<input type="text" value="0.03"/>	<input type="text" value="0.5"/>	3
X		<input type="text" value="0.3"/>	X
Unloading Behavior Unloading Stiffness Factor <input type="text" value="0.2"/> Min -1 Max +1 This factor controls the unloading behavior for a trilinear F-D relationship. You can use Plot Loops to show the effect. See the User Guide for details.			
<input type="button" value="Paste"/>		<input type="button" value="Copy"/> <input type="button" value="Clear"/>	

**Figura N°55:** Ejemplo de definición de los parámetros de degradación de rigidez

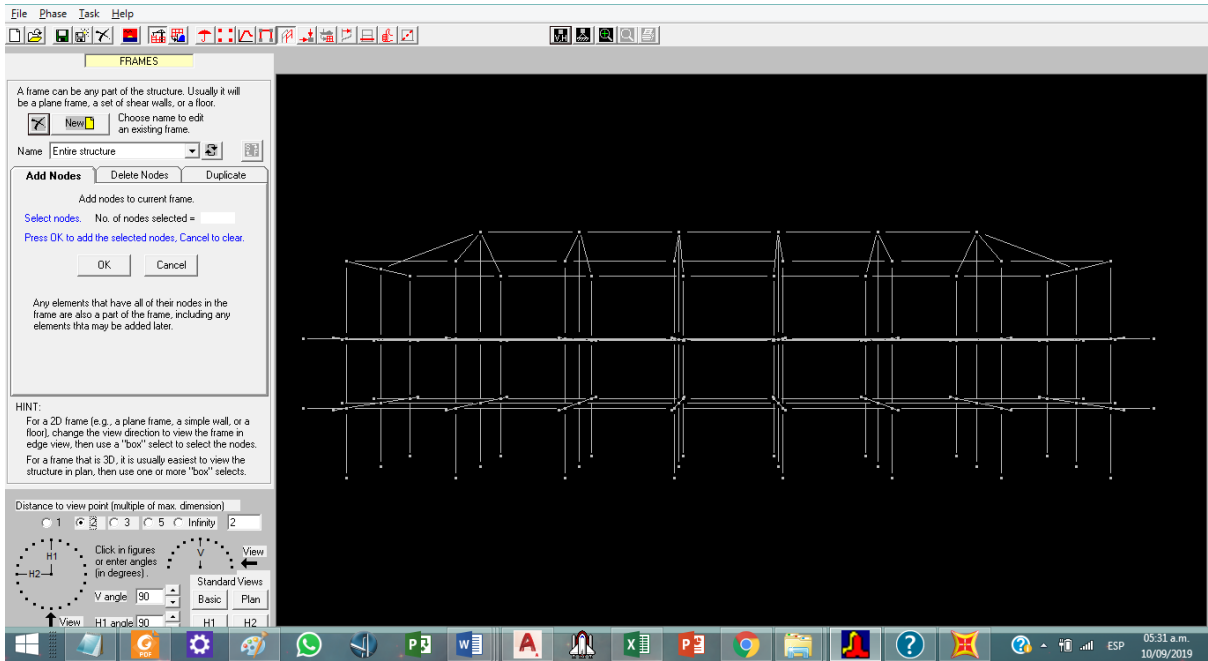


(a)

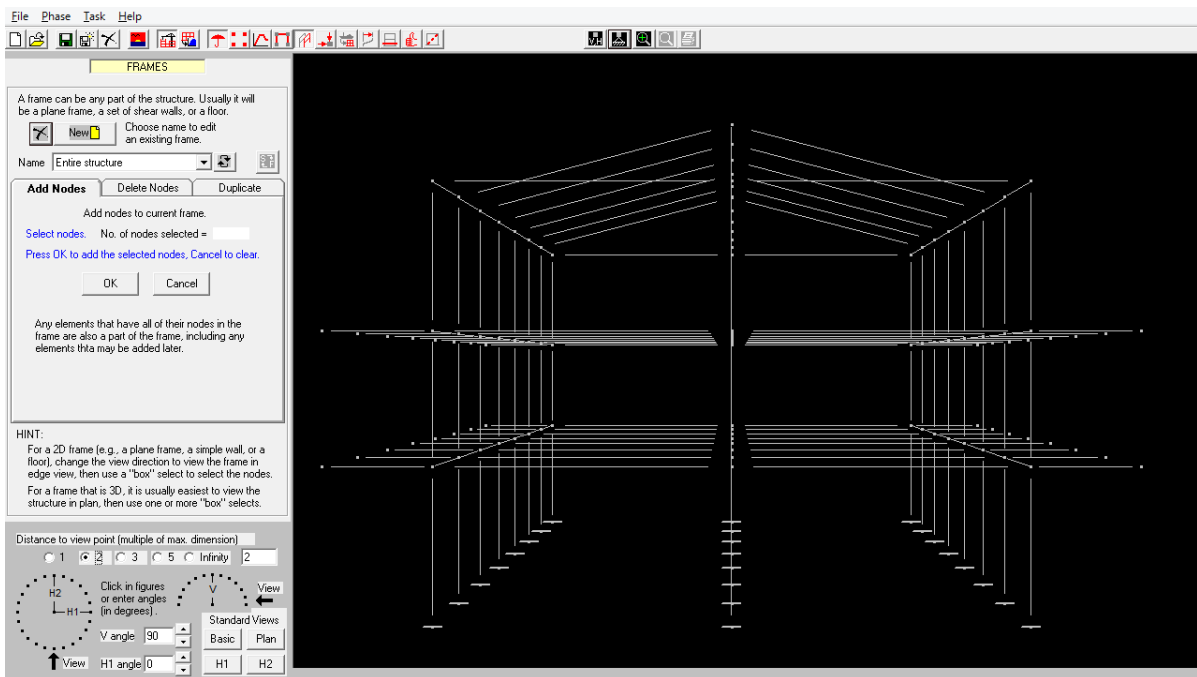


(b)

**Figura N°57:** (a), (b) Vista lateral y frontal del modelo de análisis del edificio 2H desarrollado en Perform 3D



(a)

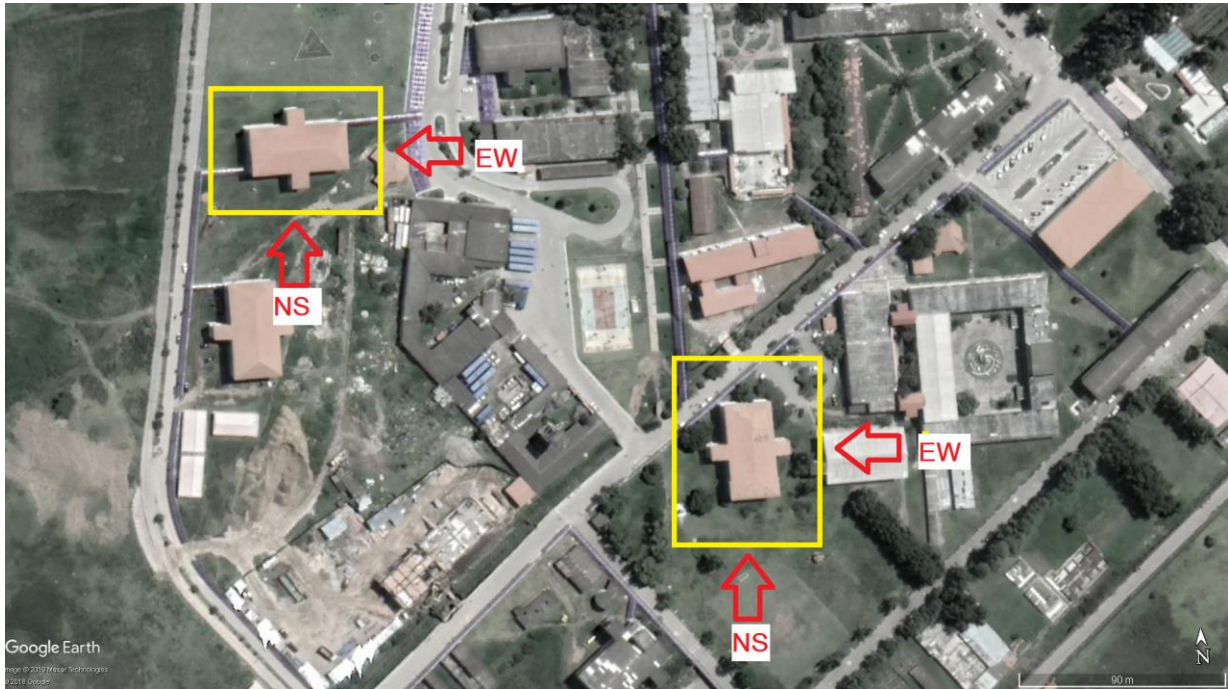


(b)

**Figura N°58:** (a), (b) Vista lateral y frontal del modelo de análisis del edificio 4F desarrollado en Perform 3D

### 3.3.4 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

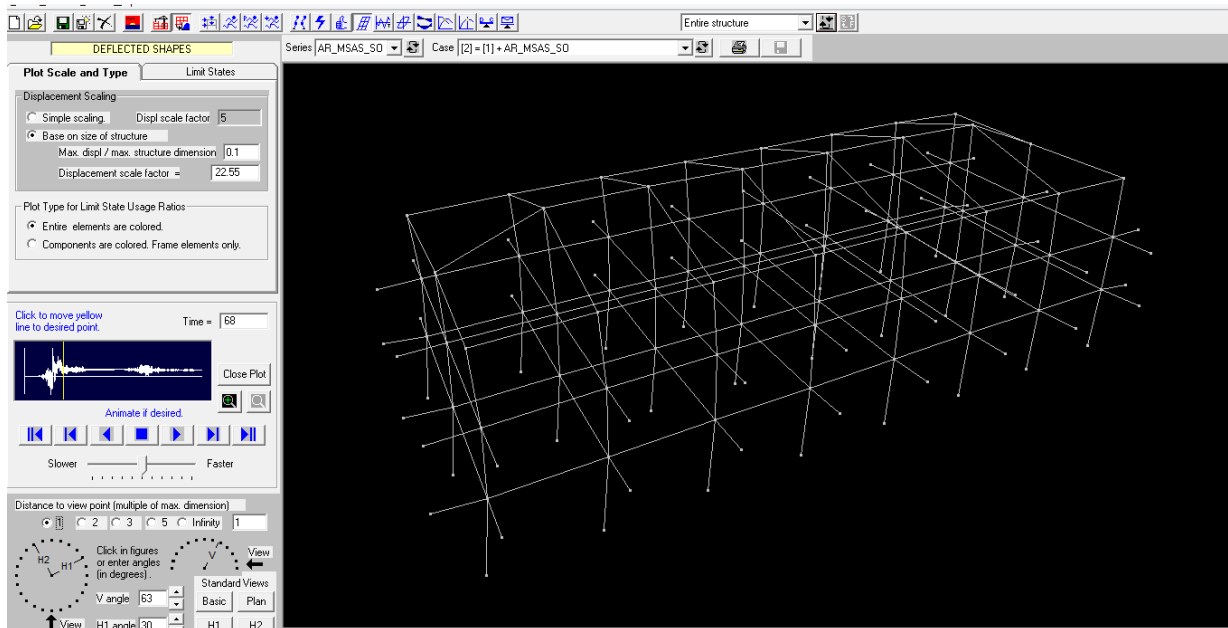
Se empleó análisis dinámico no lineal para calcular los parámetros de demanda de ambas edificaciones. El análisis se realizó con las dos componentes horizontales de cada registro sísmico NS: norte-sur y EW: este-oeste aplicadas simultáneamente en cada edificio.



**Figura N°58:** Dirección de aplicación de las componentes horizontales de cada registro sísmico en las edificaciones de estudio.

El amortiguamiento fue tomado como 5% del amortiguamiento crítico para todos los modos de vibración, del mismo modo 0.2% de amortiguamiento de Rayleigh fue asignado para asegurar que los modos altos no dominen la respuesta (Al Mamum y Saatciolu 2017). La masa asociada con el peso propio de la estructura, la sobrecarga permanente y la carga viva fueron aplicadas a cada nodo de la estructura.





**Figura N°59:** Respuesta estructural para análisis no lineal del edificio 2H sometido al registro sísmico de Arequipa 2001 escalado a un nivel de peligro sísmico de Sismo Ocasional (PGA=0.47g)

### 3.3.5 ESTIMACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO

El desempeño sísmico se ha estimado para cada edificio en cada nivel de peligro sísmico definido en el ítem 3.3.2.1-A. Este se ha determinado en cada caso para los siete registros sísmicos aislados y luego para las secuencias de sismos y réplicas. Los resultados en ambos casos han sido luego comparados para determinar el efecto de la incorporación de réplicas.

El nivel de desempeño alcanzado para cada escenario sísmico se ha estimado de los parámetros de demanda obtenidos en el análisis dinámico no lineal, y los niveles de desempeño indicados en el ítem 2.2.9 Los parámetros de demanda usados son: deriva de entrepiso e índice de daño.

Las derivas de entrepiso se han obtenido a partir de los desplazamientos producidos en cada nodo.

El índice de daño ha sido estimado de acuerdo con Park y Ang (1985) a partir de los resultados obtenidos (rotación máxima en los extremos y energía disipada) para algunos elementos estructurales.

## **3.4 TRATAMIENTO, ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

### **3.4.1 POBLACIÓN Y MUESTRA**

El universo de estudio lo constituyen todos los edificios de concreto armado en el Perú cuyo sistema estructural sea de pórticos resistentes a momento (porticado). La población está conformada por edificios del tipo educacional debido a su importancia para la sociedad. La muestra la conforman los edificios del campus universitario de la Universidad Nacional de Cajamarca. Finalmente la unidad de análisis son los edificios 2H y 4F.

### **3.4.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

### **3.4.2 TIPO DE ANÁLISIS**

El análisis realizado en esta investigación es del tipo Descriptivo – Cuantitativo. Primero se describen las características de las edificaciones y su entorno, luego la información es procesada en base a las hipótesis planteadas. Finalmente los resultados son cuantificados, analizados y contrastados.

### **3.4.3 RECOLECCIÓN DE DATOS**

Los datos necesarios para el desarrollo de la presente investigación han sido obtenidos de los expedientes técnicos de los edificios 2H y 4F. Además se han tomado los datos de las investigaciones hechas a estos edificios por Orrillo (2014) y Bolaños (2015); y de inspecciones visuales a los edificios.

### **3.4.4 PROCESAMIENTO DE DATOS**

Los datos obtenidos en el presente estudio se han procesado en computadora mediante los siguientes software: SAP2000, PERFORM 3D, SeimoMatch 2018, Autocad 2018 y Microsoft Excel 2013.

- SAP2000: Modelamiento de las edificaciones en estudio.
- PERFORM 3D: Modelamiento, análisis dinámico no lineal y respuesta sísmica de las edificaciones

- SeimoMatch 2018: Manejo y ajuste espectral de registros sísmicos.
- SeismoSpect 2018: Manejo de registros sísmicos
- Autocad 2018: Manejo de planos de las configuraciones estructurales de los edificios
- Microsoft Excel 2013: Manejo de registros sísmicos y manejo de datos obtenidos de la respuesta sísmica de la estructura.

### **3.4.5 ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

La presentación de los resultados obtenidos se ha detallado y resumido en tablas y gráficos; y se muestra en el siguiente capítulo.

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

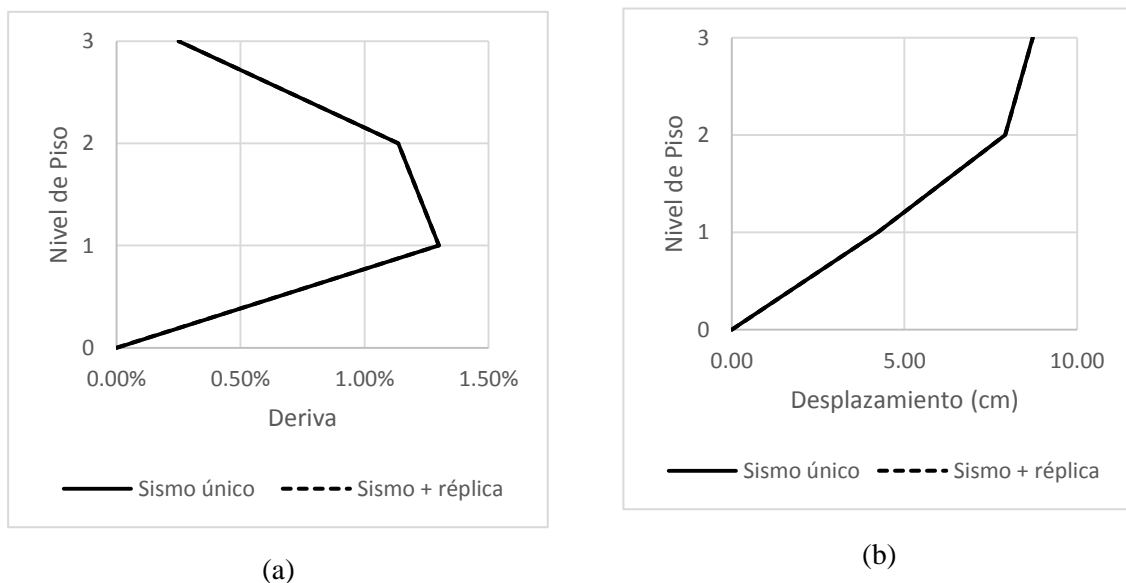
### 4.1 DERIVAS Y DESPLAZAMIENTOS DE ENTREPISO

Se han determinado los valores de los desplazamientos de entrepiso y las derivas correspondientes para las condiciones de eventos únicos y secuencias de sismos + réplicas, para todos los eventos sísmicos escalados a los cuatro niveles de peligro sísmico (frecuente, ocasional, raro y muy raro). Los resultados siguientes muestran el promedio de los valores obtenidos en cada dirección de análisis.

#### 4.1.1 EDIFICIO 2H

##### A) SISMO FRECUENTE

##### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°60:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Según la Figura N°60 las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 2H para un sismo de tipo frecuente en la dirección NS no muestran diferencias cuando se incorporan réplicas en su análisis (los gráficos se superponen). Relacionando los valores obtenidos con el rango de valores de derivas para estimar su desempeño se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla N°24:**

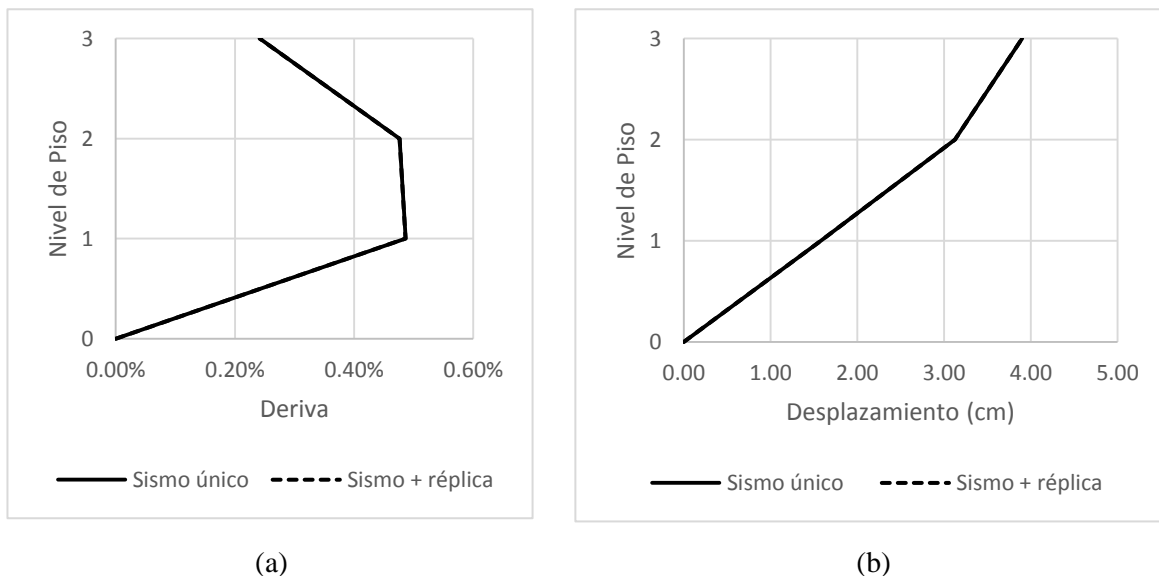
Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (NS) según derivas de entrepiso

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>					X	X				
<b>Nivel 02</b>					X	X				
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Como se muestra en la tabla N°24 se ha estimado el desempeño del edificio en cada nivel. El nivel 01 y el nivel 02 son los más afectados alcanzando un desempeño de “seguridad de vida”, lo cual indicaría una reducción en su capacidad de carga y rigidez y daños en los elementos estructurales. El nivel 03 alcanza un desempeño “operacional”, es decir, no sufre mayores daños. Esta variación en el desempeño alcanzado entre los primeros niveles y el último nivel evidenciaría un posible fallo por piso blando.

**Dirección Este-Oeste (EW)**



**Figura N°61:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de Sismo Frecuente en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo a la Figura N°61 las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 2H para un sismo de tipo frecuente en la dirección **EW** no presentan diferencias cuando se incorporan réplicas en su análisis (los gráficos se superponen). En comparación con la dirección **NS**, las derivas y desplazamientos son menores, por lo que alcanza un mejor desempeño.

**Tabla N°25:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (EW) según derivas de entrepiso

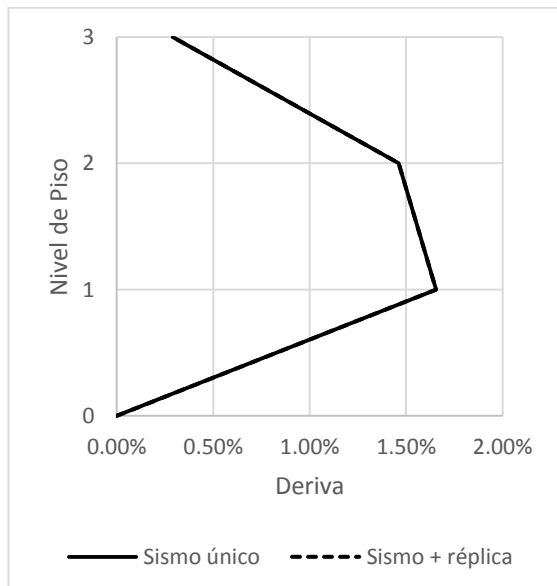
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>			X	X						
<b>Nivel 02</b>	X	X								
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

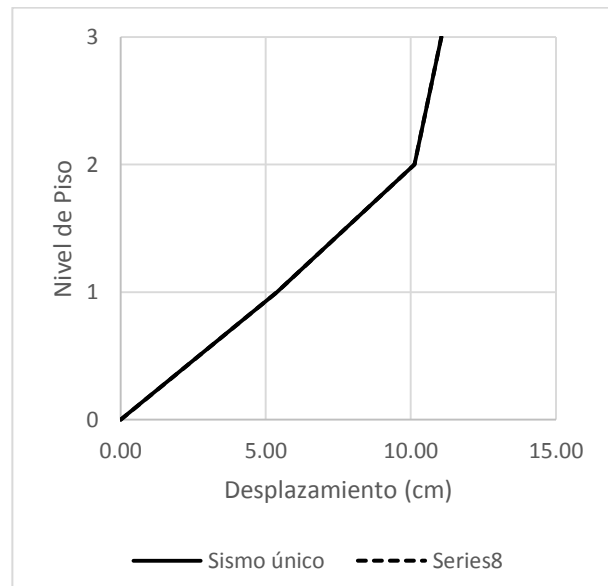
En el primer nivel se obtiene un desempeño “funcional”, es decir los elementos estructurales mantienen en gran medida su capacidad de carga y rigidez, para los niveles 02 y 03 se obtiene un desempeño “operacional”, es decir sin daños que afecten su uso.

## B) SISMO OCASIONAL

### Dirección Norte-Sur (NS)



(a)



(b)

**Figura N°62:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

La Figura N°62 expone las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 2H para un sismo de tipo ocasional en la dirección NS. No se evidencian diferencias cuando se incorporan réplicas en su análisis por lo que los gráficos se superponen. Si se compara las derivas con los intervalos de desempeño sísmico, se obtiene:

**Tabla N°26:**

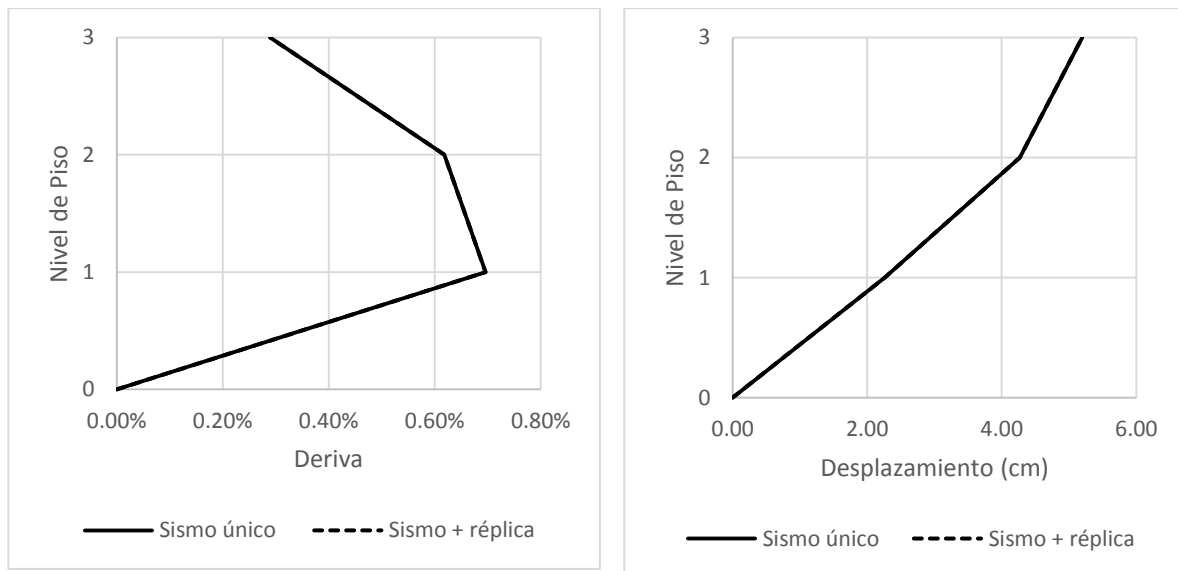
Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico ocasional** en dirección (NS) según derivas de entrepiso

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>					X	X				
<b>Nivel 02</b>					X	X				
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

La tabla N°26 presenta una gran diferencia en el desempeño alcanzado entre los primeros niveles y el último nivel. El primer y segundo nivel alcanzan un desempeño de “seguridad de vida”, es decir, daño permanente y reducción en su capacidad de carga. El nivel 03 se mantiene en un estado “operacional”, lo que evidenciaría un posible fallo por piso blando.

**Dirección Este-Oeste (EW)**



**Figura N°63:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo a la Figura N°63 las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 2H para un sismo de tipo ocasional en la dirección **EW** no evidencia diferencias cuando se incorporan réplicas en su análisis, por lo que los gráficos se superponen. Luego, comparando el desempeño alcanzado en ambos casos:

**Tabla N°27:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico **ocasional** en dirección (**EW**) según derivas de entrepiso

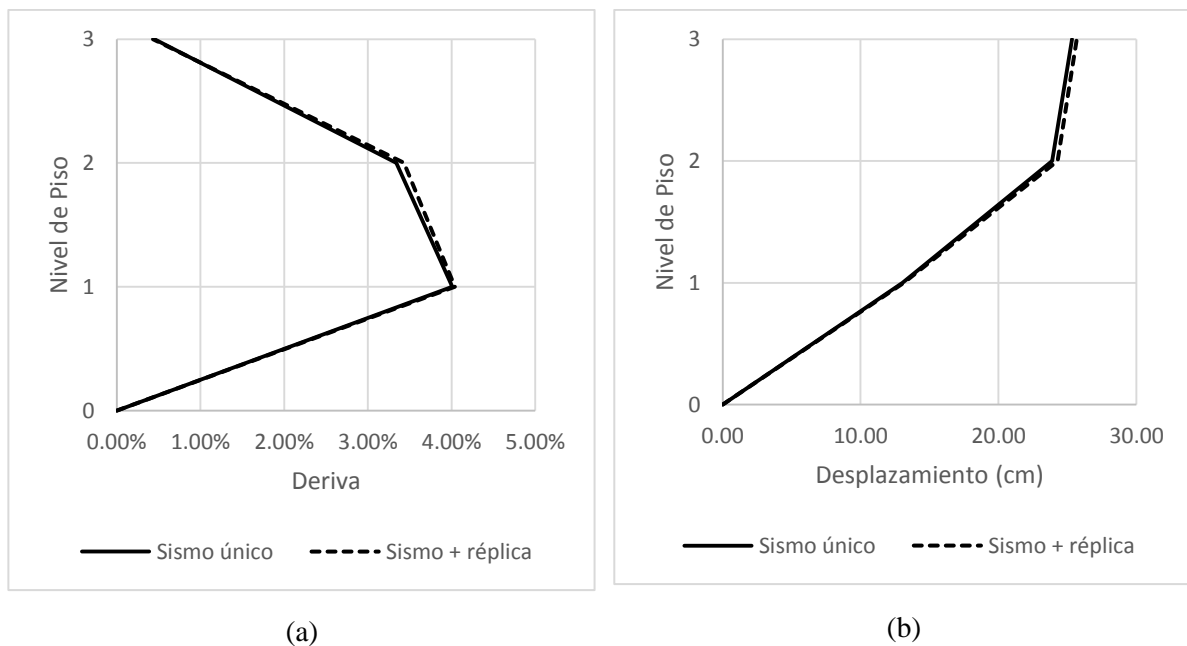
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>			X	X						
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

En esta dirección el edificio 2H alcanza un mejor comportamiento que en la dirección NS. Se observa que en el primer y segundo nivel alcanza un desempeño “funcional”, y el último nivel mantiene un desempeño “operacional”.

### C) SISMO RARO

#### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°64:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.



Según la figura N°64 las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 2H para un sismo de tipo raro en la dirección NS presentan un pequeño incremento cuando se incorporan réplicas en su análisis. Este incremento se da en el segundo nivel y es de alrededor de 0.1% para las derivas. Sin embargo, el desempeño alcanzado es el mismo en ambos casos:

**Tabla N°28:**

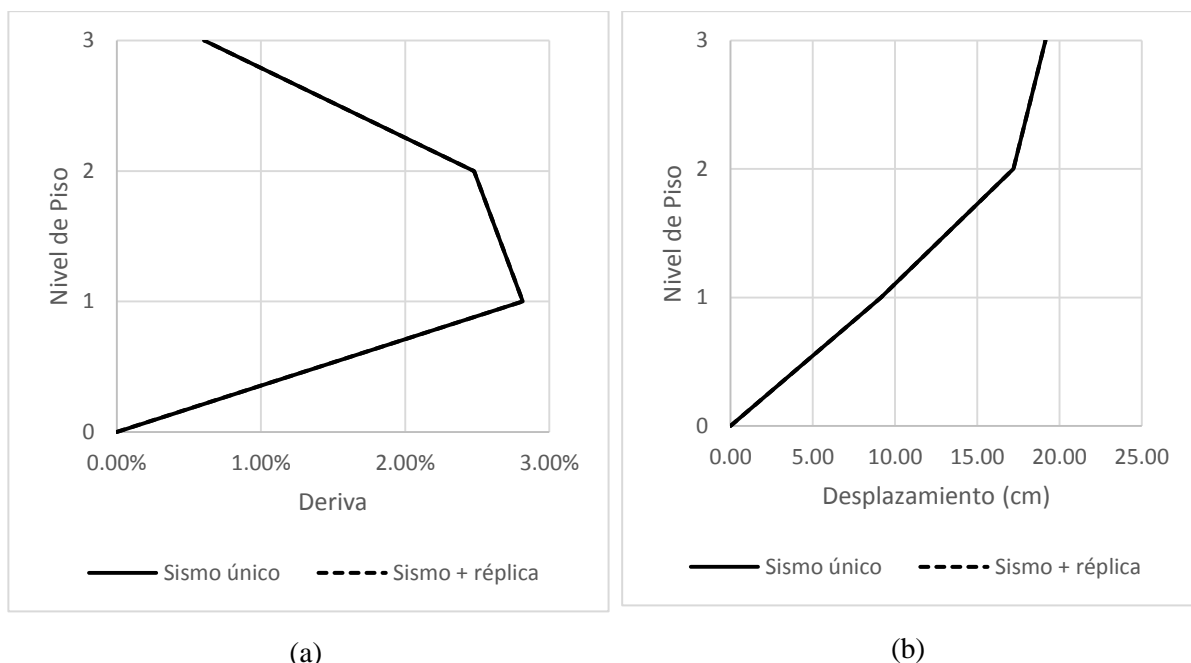
Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico raro en dirección (NS) según derivas de entrepiso

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

De acuerdo a la tabla n°28 se observa una gran diferencia en el desempeño alcanzado entre los primeros niveles y el último nivel. Los niveles 01y 02 alcanzan un desempeño “cerca al colapso”, lo que evidenciaría poca capacidad de carga y rigidez, y daño extenso. El nivel 03 se mantiene “operacional”, evidenciando un posible fallo por mecanismo de piso blando.

### Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°65:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

La Figura N°65 muestra las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 2H para un sismo de tipo raro en la dirección **EW**. En esta dirección no se aprecian diferencias cuando se incorporan réplicas en su análisis. Por tanto el desempeño alcanzado es el mismo en ambos casos:

**Tabla N°29:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico raro** en dirección (**EW**) según derivas de entrepiso

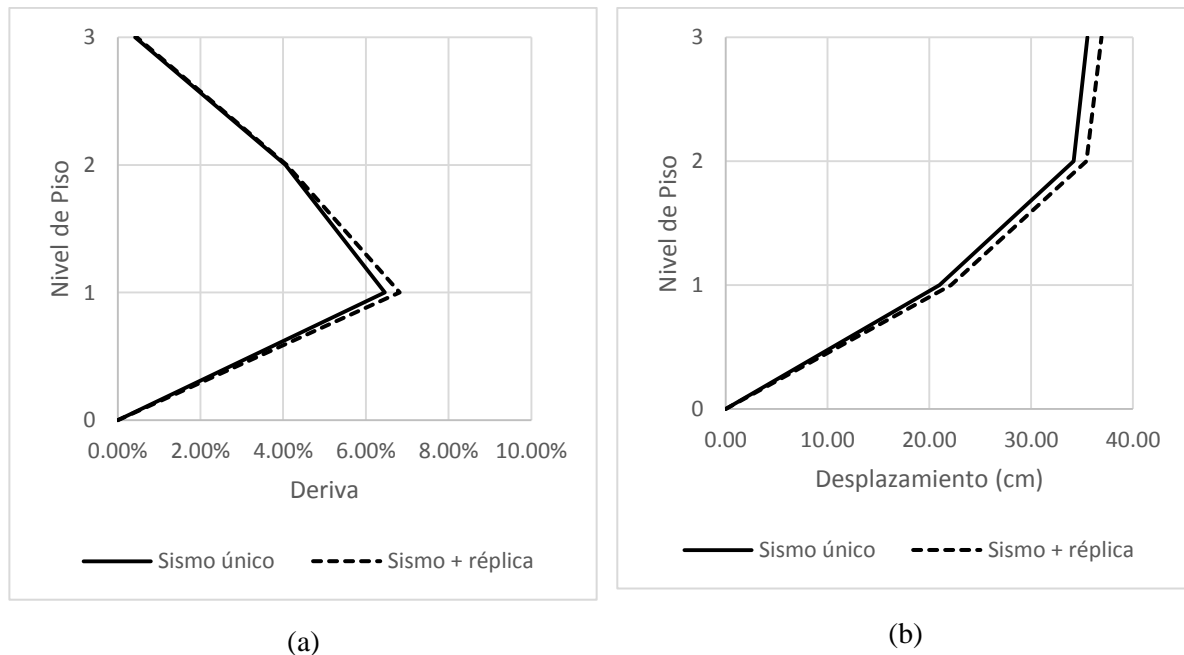
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>					X	X				
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Según la tabla N°29 el nivel 01 es el que sufre mayores daños en esta dirección de análisis (**EW**) para un sismo raro. Su desempeño es “cerca al colapso” mientras que en el nivel 02 es de “seguridad de vida” y en el nivel 03 “operacional”.

#### D) SISMO MUY RARO

##### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°66:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (**NS**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Como se observa en la Figura N°66 las derivas y desplazamientos obtenidos para el edificio 2H para un sismo de tipo muy raro en la dirección NS se incrementan al incorporar réplicas. Este incremento es de alrededor de 0.40% para el nivel 01 y muy pequeño para los otros niveles. Sin embargo, esta diferencia no es suficiente para cambiar su desempeño dentro de los intervalos establecidos.

**Tabla N°30:**

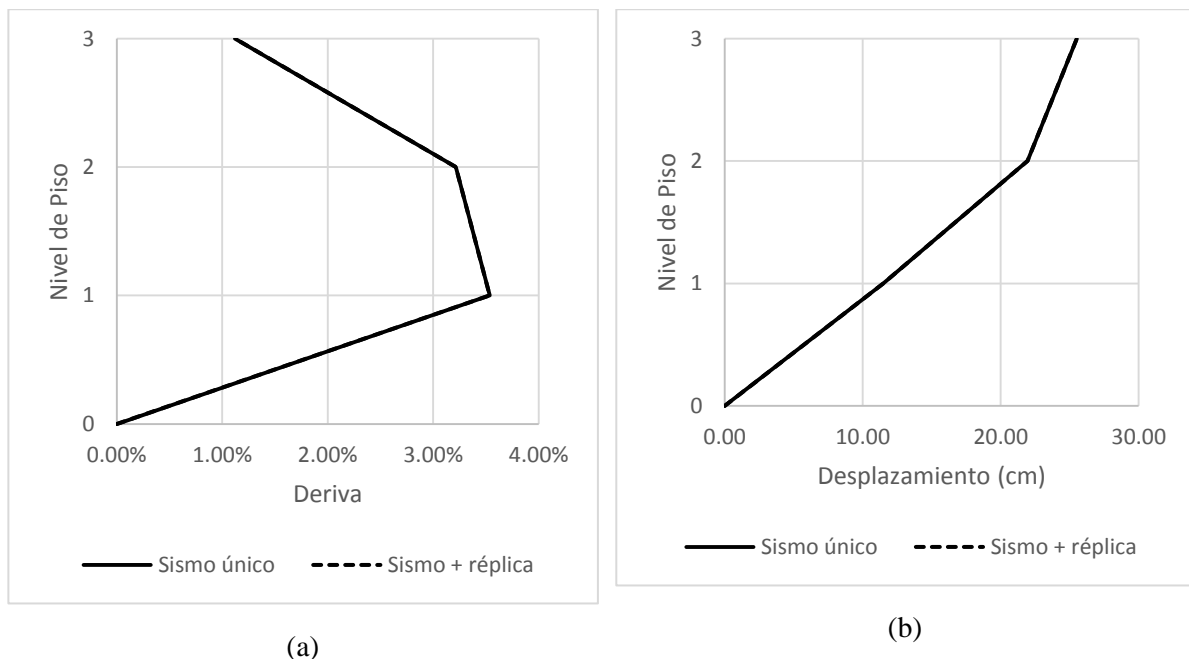
Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico **muy raro** en dirección (NS) según derivas de entrepiso

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>									X	X
<b>Nivel 02</b>									X	X
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

En esta dirección de análisis como se muestra en la tabla N°26 el edificio alcanza el colapso para los niveles 01 y 02. El desempeño “operacional” en el nivel 03 evidencia un fallo por mecanismo de piso blando.

**Dirección Este-Oeste (EW)**



**Figura N°67:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo a la Figura N°67 las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 2H para un sismo de tipo muy raro en la dirección EW no presenta diferencias cuando se incorporan réplicas en su análisis (los gráficos se superponen). Por tanto el desempeño alcanzado es el mismo en ambos casos:

**Tabla N°31:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro sísmico muy raro en dirección (EW) según derivas de entrepiso

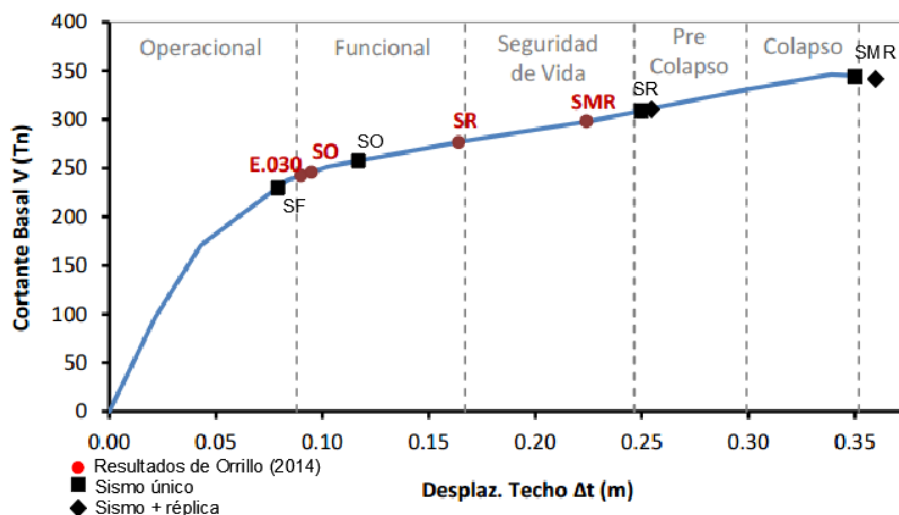
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

El desempeño, como se muestra en la tabla N°31, es el mismo para sismos únicos y con réplicas, “cerca al colapso” en los niveles 01 y 02 y “operacional” en el nivel 03, por lo que mayor daño se ha producido en los primeros niveles.

## DESEMPEÑO GLOBAL

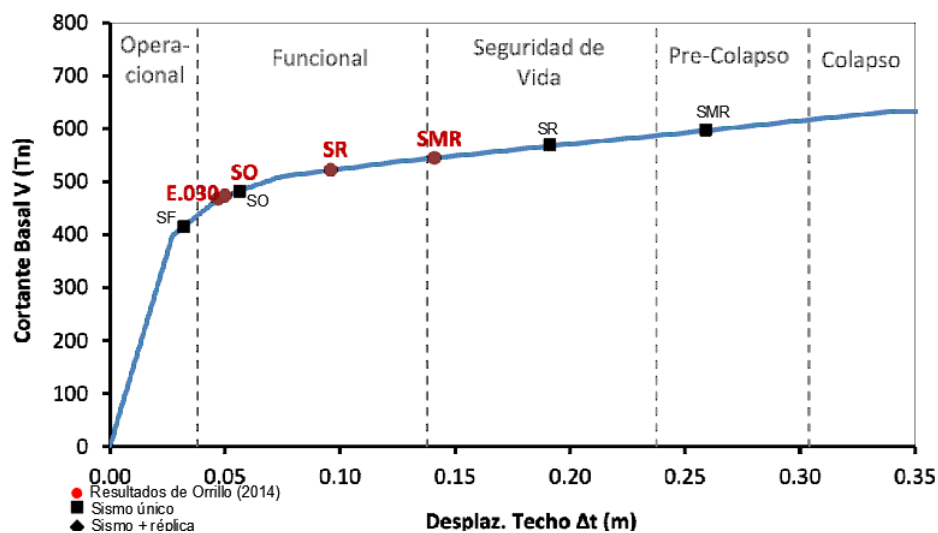
El desempeño global de todo el edificio es posible estimarlo comparando los resultados obtenidos del máximo desplazamiento del último nivel de piso con la curva de capacidad para cada dirección de análisis presentada en el estudio de Orrillo (2014).



**Figura N°68:** Desempeño sísmico obtenido para el edificio 2H en la dirección NS en comparación con los resultados del estudio realizado por Orrillo (2014). SF: sismo frecuente, SO: sismo ocasional, SR: Sismo raro y SMR: Sismo muy raro.

Fuente: Elaborado en base a Orrillo (2014)

De acuerdo con la figura N°68 el desempeño global del edificio 2H en la dirección NS es el mismo para sismos únicos y sismos con réplicas en los niveles de peligro sísmico “frecuente” y “ocasional”. Para los niveles “raro” y “muy raro” se hace notorio el efecto de la incorporación de réplicas debido a que los desplazamientos se incrementan, aunque se mantienen en los mismos intervalos de desempeño. Por otro lado, es posible notar la diferencia de resultados obtenidos respecto a los que presenta Orillo (2014). En su estudio, para un sismo raro y muy raro el edificio alcanza un desempeño sísmico de “seguridad de vida”, sin embargo, en esta investigación este alcanza un desempeño “pre colapso” y “colapso”.



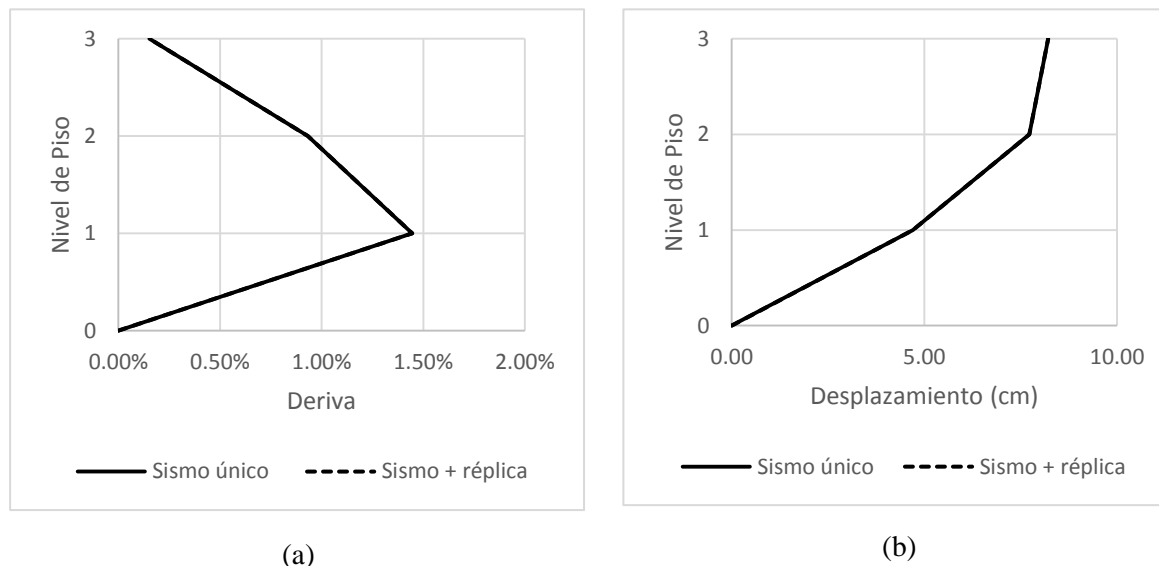
**Figura N°69:** Desempeño sísmico obtenido para el edificio 2H en la dirección EW en comparación con los resultados del estudio realizado por Orillo (2014). SF: sismo frecuente, SO: sismo ocasional, SR: Sismo raro y SMR: Sismo muy raro.

Fuente: Elaborado en base a Orrillo (2014)

En la figura n° 69 se observan los resultados para la otra dirección de análisis (EW). En esta dirección no existen diferencias de los desplazamientos máximos obtenidos para sismos únicos e incorporando réplicas. Debido a ello, el desempeño en ambos casos es el mismo. Para un sismo “frecuente” el edificio mantiene un comportamiento operacional, para un sismo “ocasional” se obtiene un desempeño funcional, para un sismo “raro” el edificio pierde su capacidad de carga y resistencia alcanzando un nivel de “seguridad de vida” y finalmente para un sismo “muy raro” el edificio alcanza un “pre colapso”.

## 4.1.2 EDIFICIO 4F

### A) SISMO FRECUENTE Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°70:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Según la Figura N°70 las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 4F para un sismo de tipo frecuente en la dirección EW no presentan diferencias cuando se incorporan réplicas en su análisis (los gráficos se superponen). Por tanto el desempeño alcanzado es el mismo en ambos casos:

**Tabla N°32:**

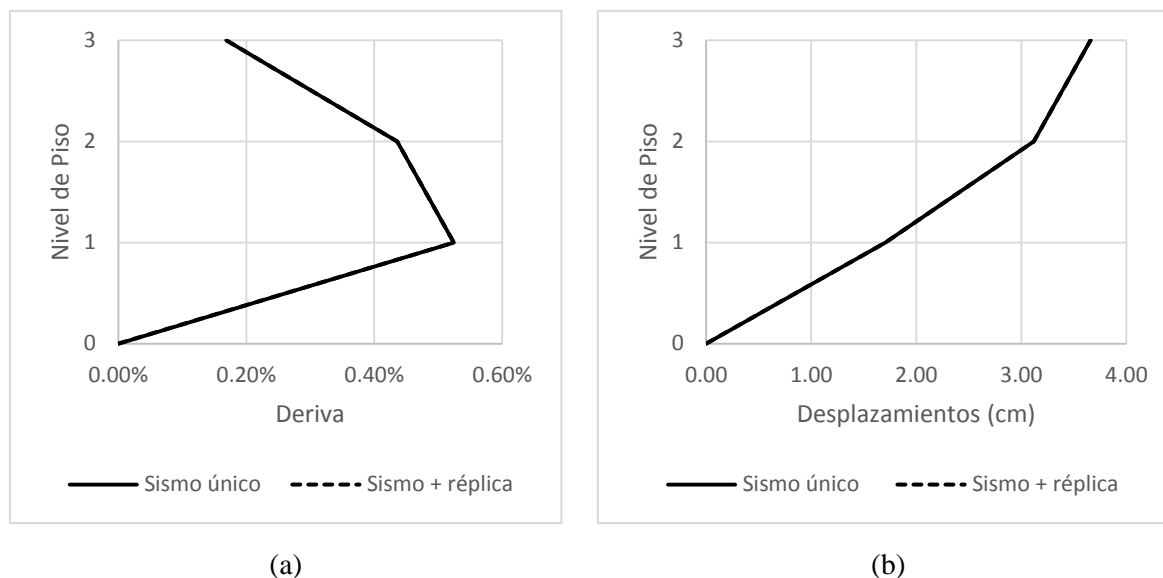
Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (EW) según derivas de entrepiso

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>					X	X				
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

El nivel 01 resulta más afectado alcanzando un desempeño de “seguridad de vida”, es decir, mantiene poca capacidad de carga y rigidez. El nivel 02 alcanza un desempeño “funcional”, es decir no ha sufrido daños que afecten su uso, y el nivel 03 un desempeño “operacional”, es decir, con daños menores.

### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°71:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de Sismo Frecuente en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. Se observa que no existen diferencias

Como se observa en la Figura N°71 las derivas y desplazamientos alcanzados por el edificio 2H para un sismo de tipo frecuente en la dirección NS son los mismos cuando se incorporan réplicas en la evaluación (los gráficos se superponen). Comparando estos resultados con el rango de desempeño de acuerdo a las derivas obtenidas se obtiene:

**Tabla N°33:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro sísmico frecuente en dirección (NS) según derivas de entrepiso

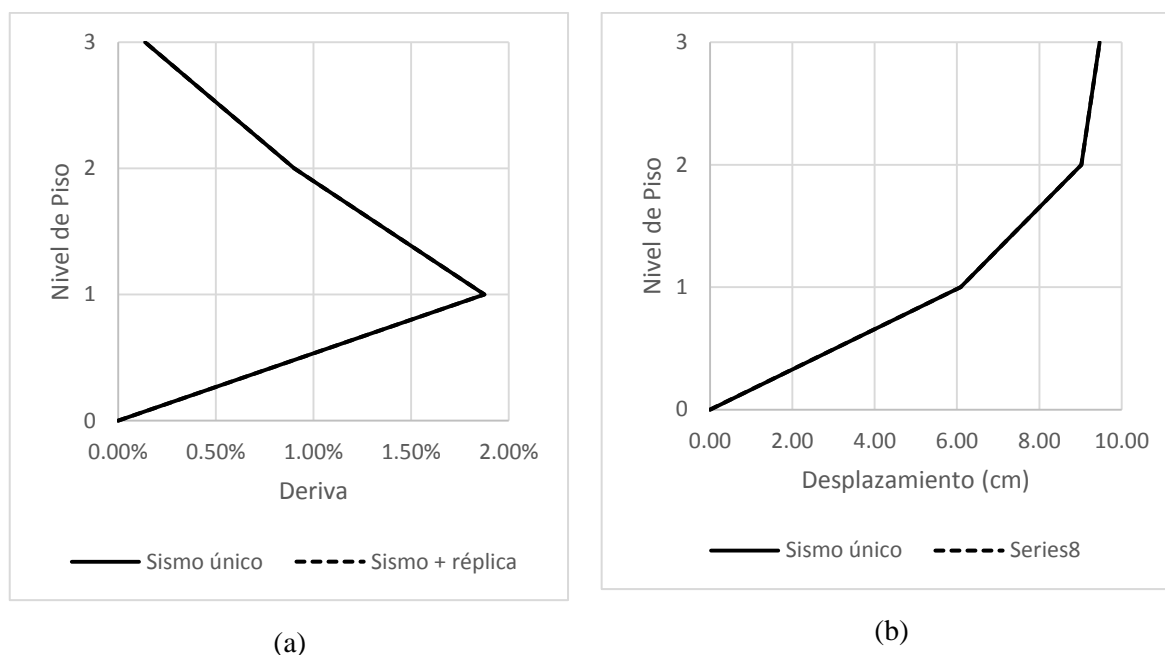
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>			X	X						
<b>Nivel 02</b>	X	X								
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

En esta dirección el edificio 4F alcanza un mejor comportamiento que en la dirección NS. Se observa que en el primer nivel alcanza un desempeño funcional, y para los últimos niveles un desempeño operacional.

## E) SISMO OCASIONAL

### Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°72:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Según la Figura N°72 las derivas y desplazamientos máximos alcanzados por el edificio 4F para un sismo de tipo ocasional en la dirección EW son los mismos para un sismo único y sismo + réplica (los gráficos se sobreponen). Por tanto el desempeño alcanzado es el mismo en ambos casos:

**Tabla N°34:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico ocasional** en dirección (EW) según derivas de entrepiso

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	SR	S	S+R
<b>Nivel 01</b>					X	X				
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

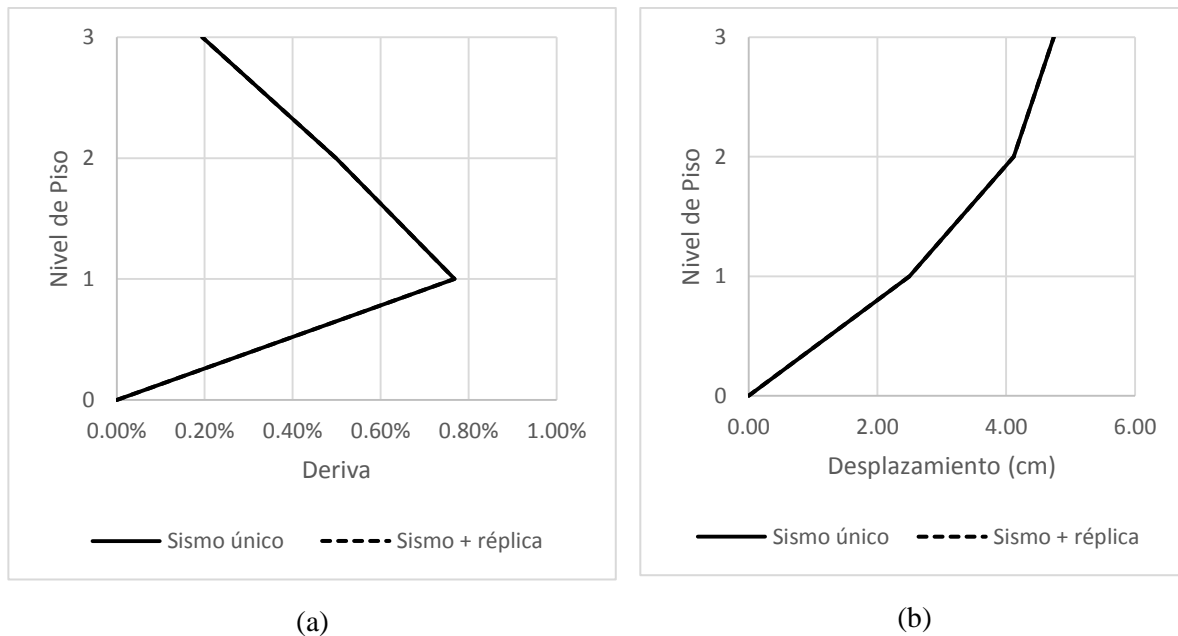
\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

La tabla n°34 muestra que el nivel 01 obtiene un desempeño de “seguridad de vida”, es decir la estructura ha perdido en gran parte su capacidad de carga y resistencia. El nivel 02 alcanza



un desempeño “funcional” y el nivel 03 un desempeño “operacional”. Debido a que el nivel 01 sufre la mayor parte del daño es posible suponer un mecanismo de falla por piso blando.

### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°73:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en el edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas. Se observa que no existen diferencias

La Figura N°73 muestra que las derivas y desplazamientos máximos alcanzados por el edificio 4F para un sismo de tipo ocasional en la dirección NS son los mismos cuando se incorporan réplicas en su análisis, por lo que los gráficos se sobreponen. Si se comparan los valores obtenidos con el rango de desempeños en derivas de entrepiso, se obtiene:

**Tabla N°35:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico ocasional** en dirección (NS) según derivas de entrepiso

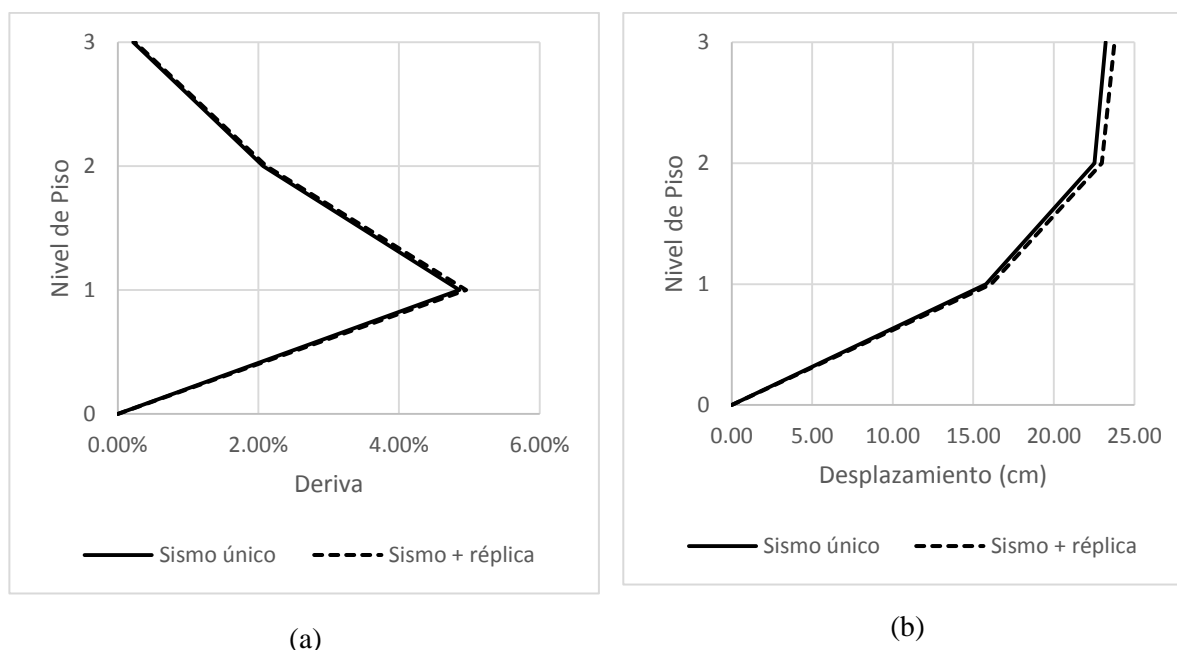
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>			X	X						
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

En esta dirección el edificio 4F alcanza un mejor comportamiento que en la dirección EW. Se observa que en el primer y segundo nivel alcanza un desempeño “funcional”, es decir, sin daños considerables que afecten su uso y el último nivel mantiene un desempeño “operacional”.

## F) SISMO RARO

### Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°74:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en el edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo con la Figura N°74 las derivas y desplazamientos máximos obtenidos por el edificio 4F para un sismo de tipo raro en la dirección EW muestran un ligero incremento cuando se incorporan réplicas en el análisis. Este es de alrededor de 0.09% en el caso de derivas en el primer nivel y más pequeño en los otros niveles. Sin embargo, el desempeño alcanzado es el mismo en ambos casos:

**Tabla N°36:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico raro** en dirección (EW) según derivas de entrepiso

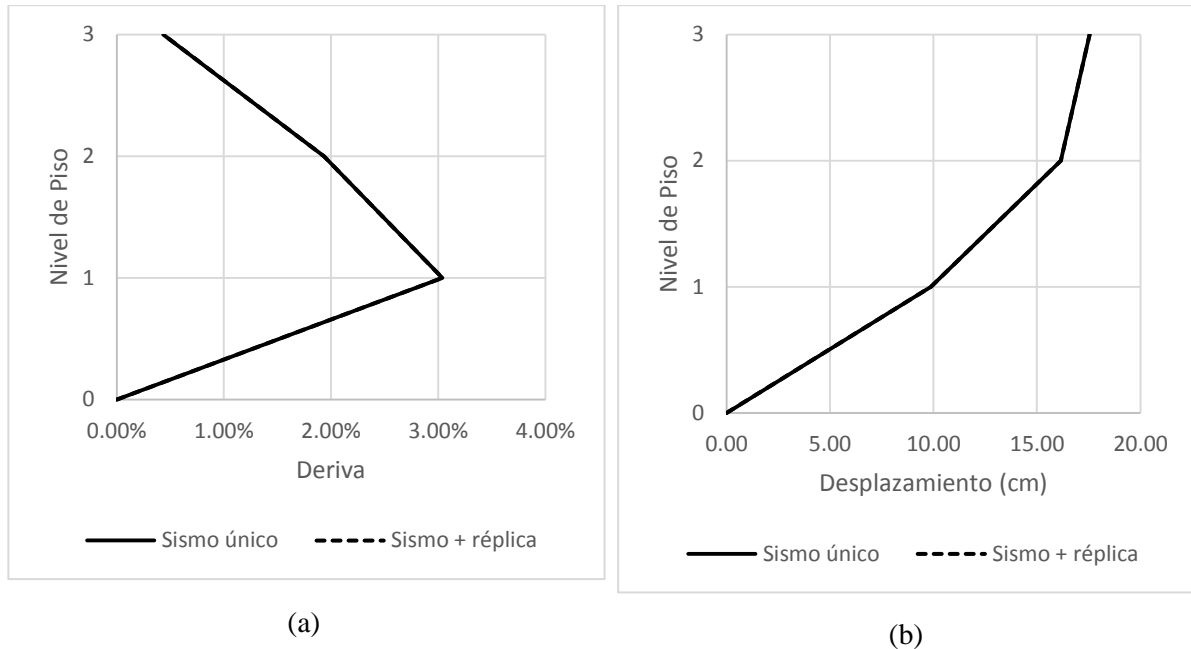
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>									X	X
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Se observa una gran diferencia en el desempeño alcanzado entre los primeros niveles y el último nivel. El nivel 01 se alcanza un estado de “colapso”, es decir la estructura ha perdido toda su capacidad de carga y resistencia, en el nivel 02 se obtiene un desempeño “cerca al

colapso”, y el nivel 03 alcanza un desempeño “operacional”, es decir, sin daños de consideración. Esta diferencia en el desempeño obtenido para el primer y último nivel muestra una posible falla por mecanismo de piso blando.

### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°75:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en el edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

La Figura N°75 muestra que las derivas y desplazamientos máximos alcanzados por el edificio 4F para un sismo de tipo raro en la dirección NS no presentan diferencias cuando se incorporan réplicas en su análisis (los gráficos se sobreponen). La tabla siguiente muestra el desempeño obtenido en todos los niveles:

**Tabla N°37:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico raro** en dirección (NS) según derivas de entrepiso

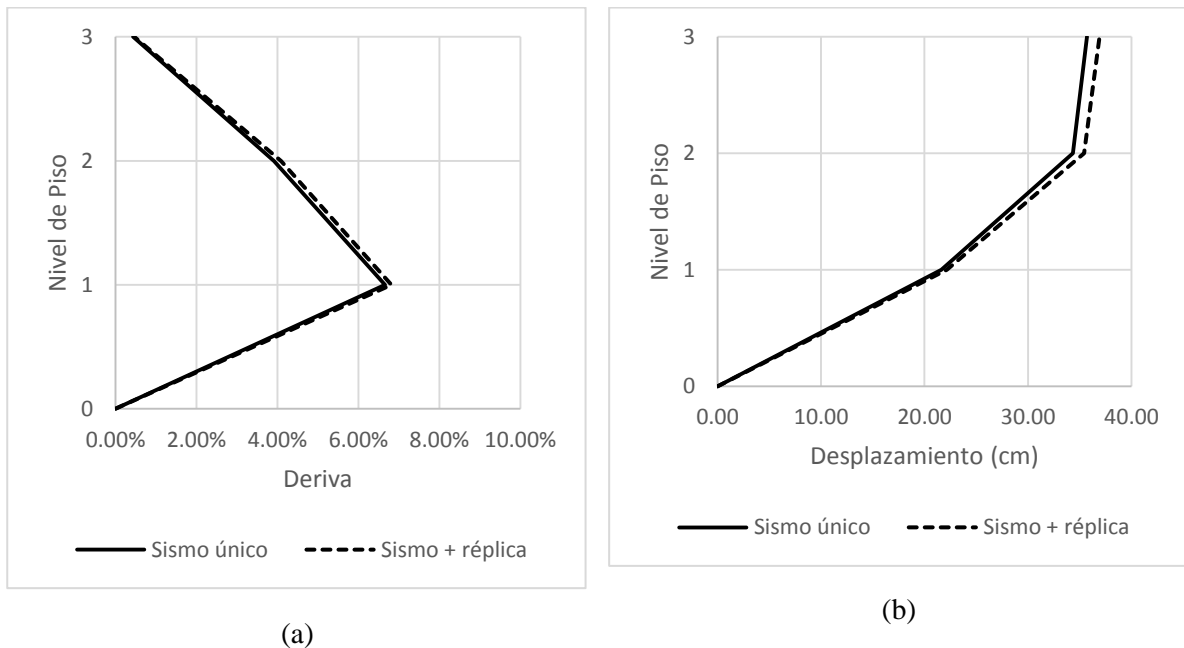
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>					X	X				
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

De acuerdo con la Tabla N°37 en esta dirección de análisis la estructura se comporta mejor que en la dirección EW. El primer nivel alcanza un desempeño “cerca al colapso”, el nivel 02 “seguridad de vida” y el nivel 03 “operacional”.

### G) SISMO MUY RARO

#### Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°76:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en el edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Como se observa en la Figura N°76 las derivas y desplazamientos máximos alcanzados por el edificio 4F para un sismo “muy raro” en la dirección NS presentan un incremento cuando se incorporan réplicas en el análisis. Esta diferencia, es derivas de entrepiso, es de 0.16% en el nivel 01 y de 0.18% en el nivel 02.

**Tabla N°38:**

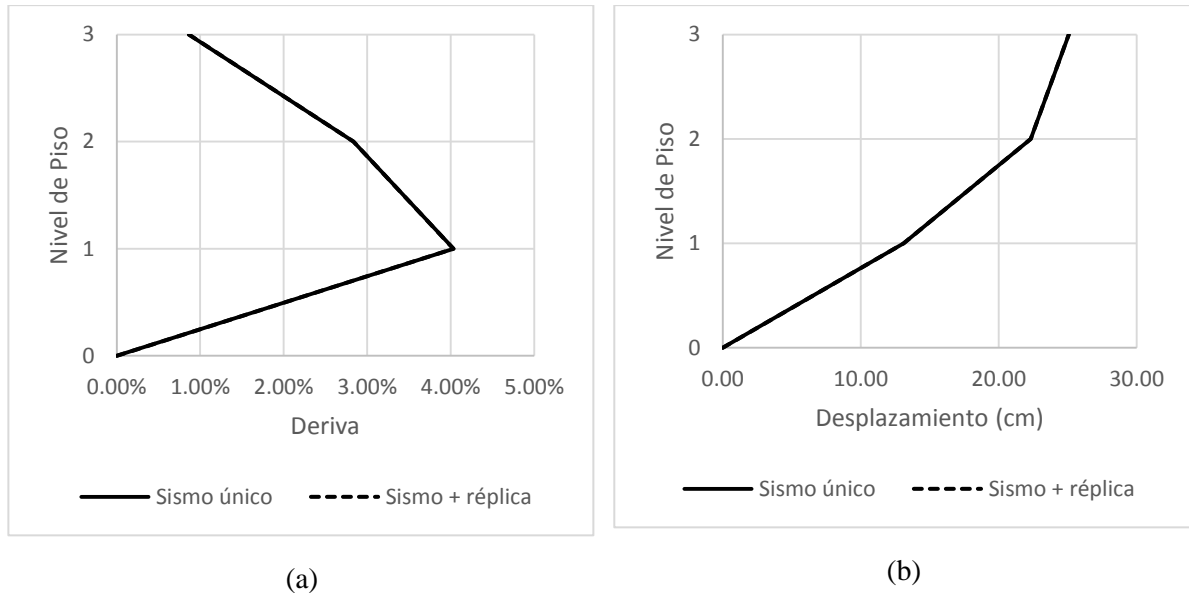
Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico muy raro** en dirección (EW) según derivas de entrepiso

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>									X	X
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

De acuerdo con la Tabla N°38 se observa una gran diferencia en el desempeño alcanzado entre los primeros niveles y el último nivel. Esto evidenciaría un posible mecanismo de falla por piso blando.

### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°77:** Comparación de (a) Derivas de entrepiso y (b) desplazamientos de entrepiso, en edificio 4F para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

La Figura N°77 muestra que las derivas y desplazamientos máximos alcanzados por el edificio 4F para un sismo “muy raro” en la dirección NS no se incrementan cuando se incorporan réplicas en su evaluación. Por tanto el desempeño alcanzado es el mismo en ambos casos:

**Tabla N°39:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico muy raro** en dirección (NS) según derivas de entrepiso

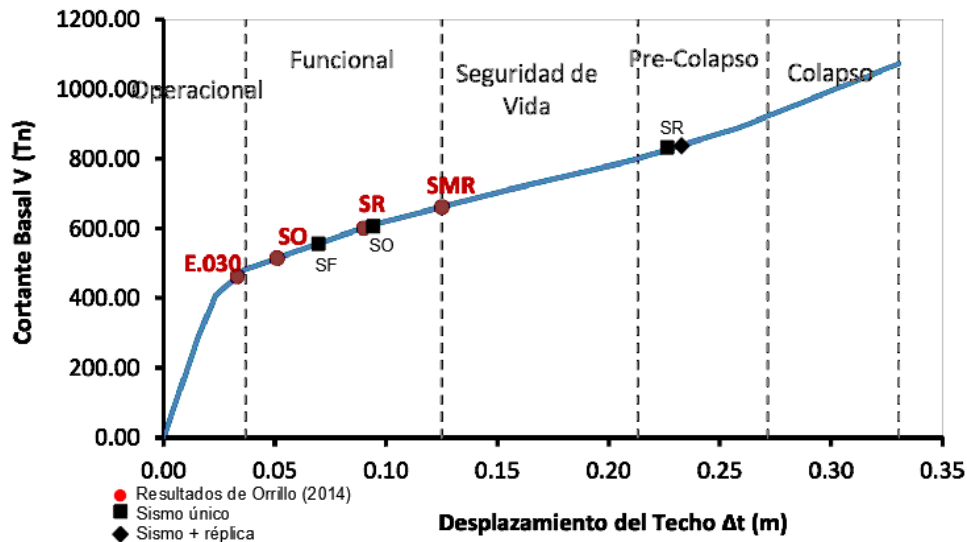
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<0.5%		0.5% a 1%		1% a 2%		2% a 4%		4%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Como se observa en la Tabla N°39 en esta dirección de análisis el edificio se comporta mejor que en la dirección EW. Aun así, los primeros niveles han sufrido mayor daño respecto al nivel 03.

## DESEMPEÑO GLOBAL

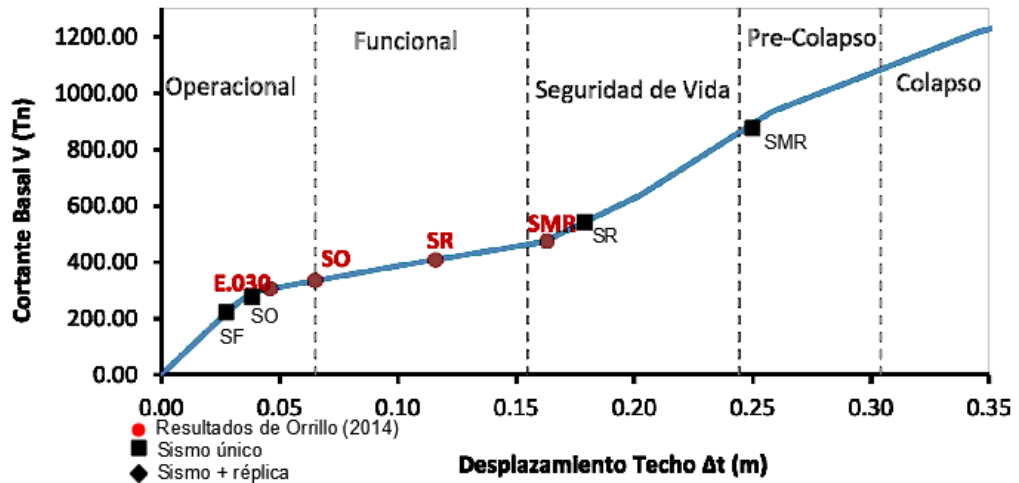
El desempeño global del edificio 4F se ha obtenido al comparar los resultados del promedio de desplazamientos máximos del último nivel de techo para todas las secuencias sísmicas con la curva de capacidad obtenida en el estudio de Bolaños (2015):



**Figura N°78:** Desempeño sísmico obtenido para el edificio 4F en la dirección EW en comparación con los resultados del estudio realizado por Bolaños (2015). SF: sismo frecuente, SO: sismo ocasional, SR: Sismo raro y SMR: Sismo muy raro.

Fuente: Elaborado en base a Bolaños (2015)

Según la figura N°78 el desempeño global del edificio 4F en la dirección EW es el mismo en sismos únicos y sismos + réplicas para niveles de peligro sísmico frecuente y ocasional. Para sismo raro se aprecia el pequeño incremento en el desplazamiento en techo, sin embargo no es significativo para alterar su desempeño. En comparación con los resultados de Bolaños (2015) que muestra que el edificio alcanza un desempeño “funcional” para el sismo de diseño (sismo raro) en este estudio el edificio alcanza un desempeño “pre-colapso”.



**Figura N°79:** Desempeño sísmico obtenido para el edificio 4F en la dirección NS en comparación con los resultados del estudio realizado por Bolaños (2015). SF: sismo frecuente, SO: sismo ocasional, SR: Sismo raro y SMR: Sismo muy raro.

Fuente: Elaborado en base a Bolaños (2015)

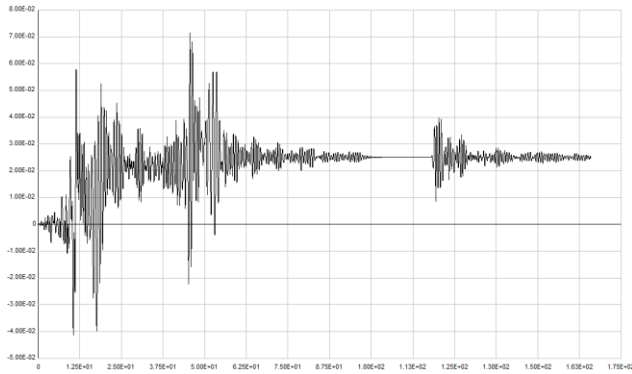
Como muestra la figura N°79 no existen diferencias en el desempeño global (desplazamiento máximo de techo) del edificio 4F en la dirección NS para eventos de sismo único y eventos que incorporan réplicas. En comparación con los resultados obtenidos por Bolaños (2015) en este estudio, el edificio 4F alcanza un mejor desempeño para los niveles de peligro sísmico de tipos frecuente y ocasional. Sin embargo, para los sismos de tipo raro y muy raro el desempeño que alcanza la estructura en este estudio es menor, alcanzándose un nivel de “seguridad de vida” y “pre colapso”

#### 4.1.3 DIFERENCIAS EN LAS RESPUESTAS ESTRUCTURALES

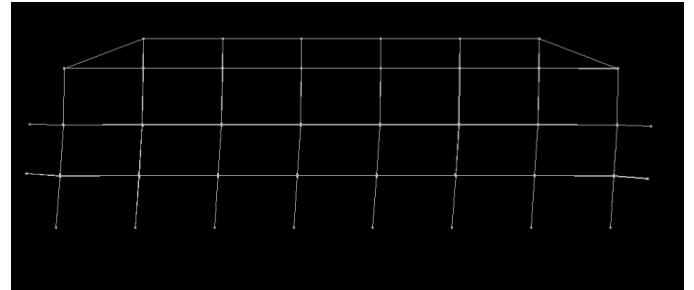
Como se ha mostrado en los resultados obtenidos, la incorporación de réplicas no producen mayores derivas o desplazamientos de entrepiso para eventos sísmicos de tipo frecuentes (periodo de retorno 43 años) y ocasionales (periodo de retorno 72 años); pero sí ocurren efectos para sismos raros (periodo de retorno 475 años) y muy raros (970 años).

Los resultados de derivas y desplazamientos de entrepiso se han obtenido del promedio de resultados para cada uno de los siete sismos presentados en la tabla N°11. Sin embargo se han observado diferencias importantes en las respuestas estructurales para cada secuencia sísmica en cada edificio evaluado. Esto es atribuible en gran medida a los parámetros de amplitud, duración y contenido de frecuencia propios de cada sismo.

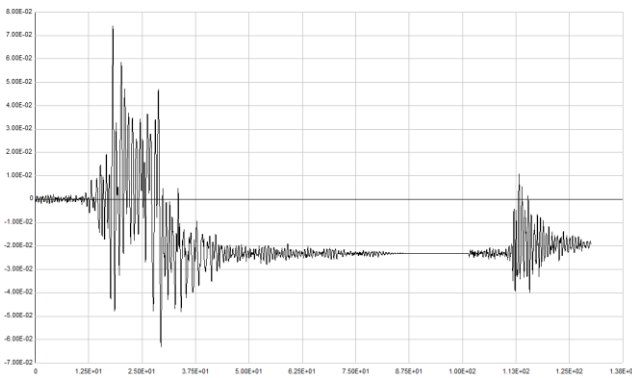
A continuación se comparan las respuestas estructurales del último nivel piso del edificio 2H para todos los registro sísmicos (ajustado a un nivel de sismo frecuente en la dirección EW).



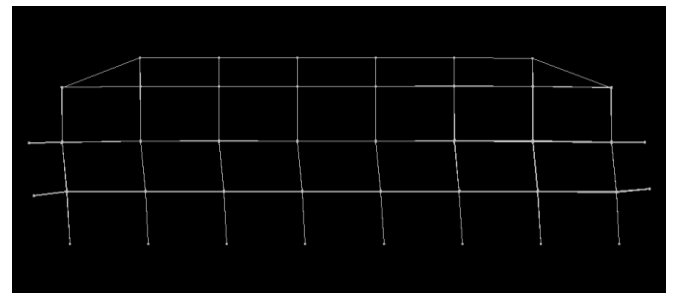
(a)



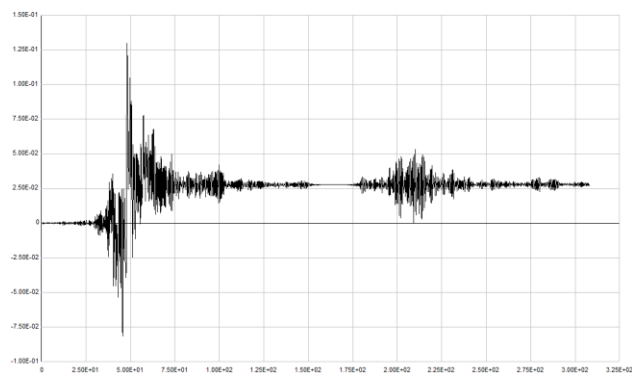
(a)



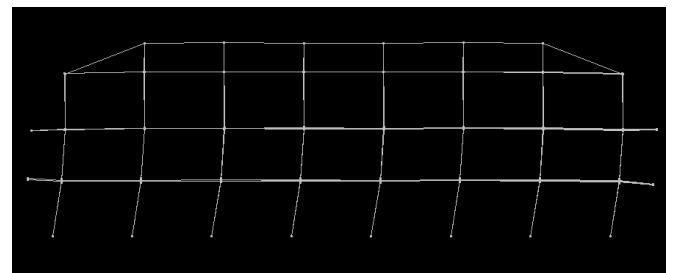
(b)



(b)

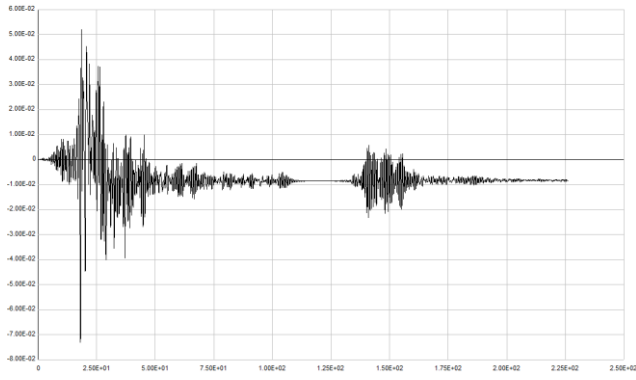


(c)

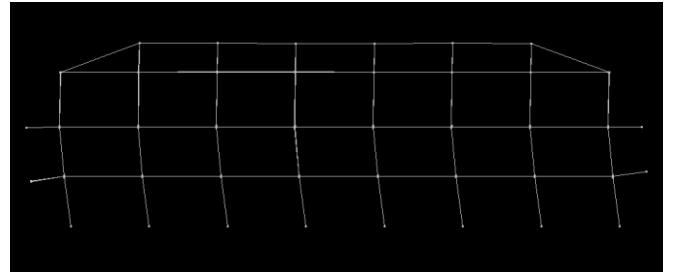


(c)

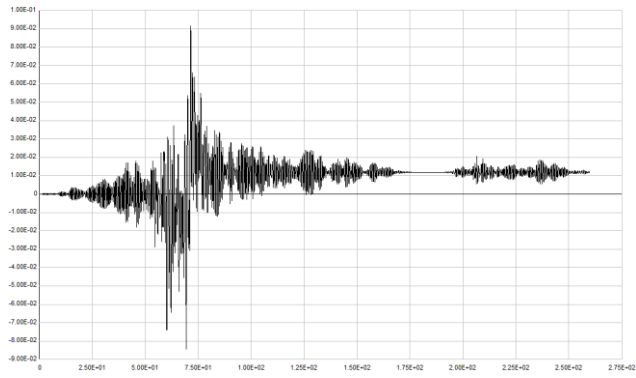




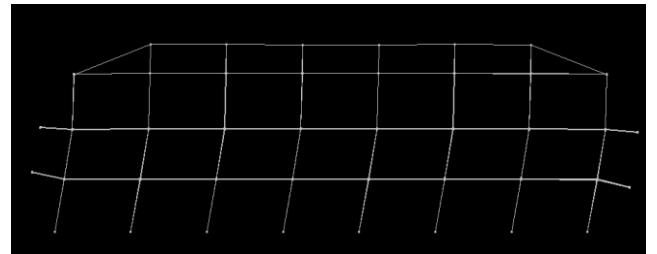
(d)



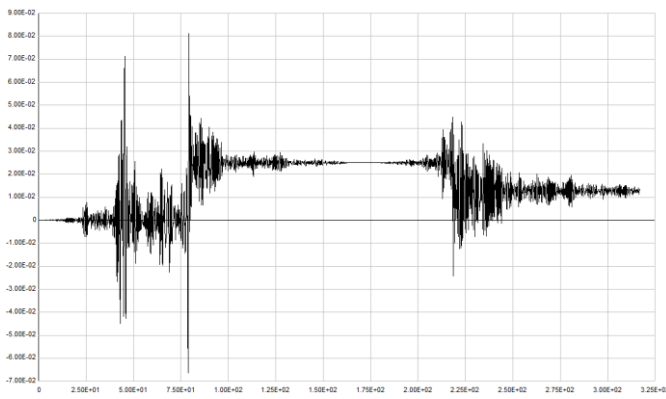
(d)



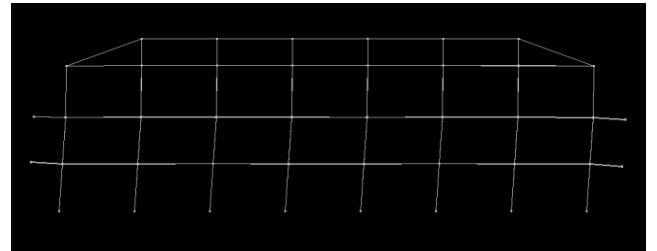
(e)



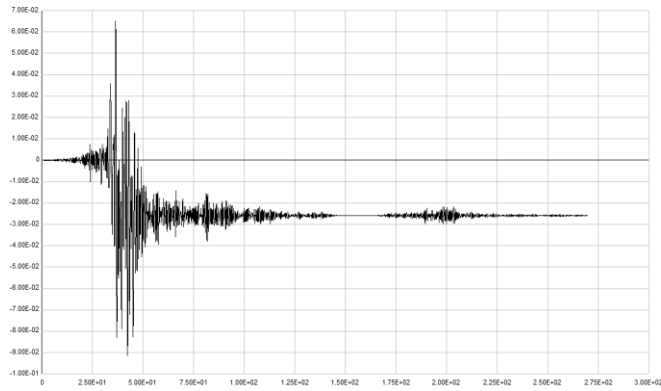
(e)



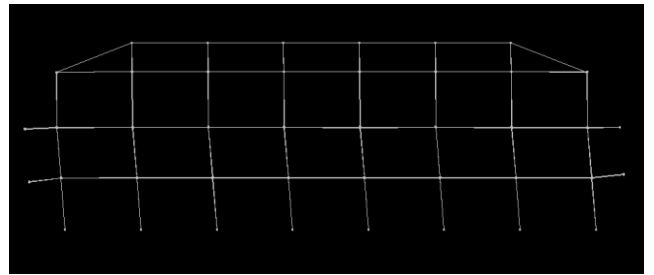
(f)



(f)



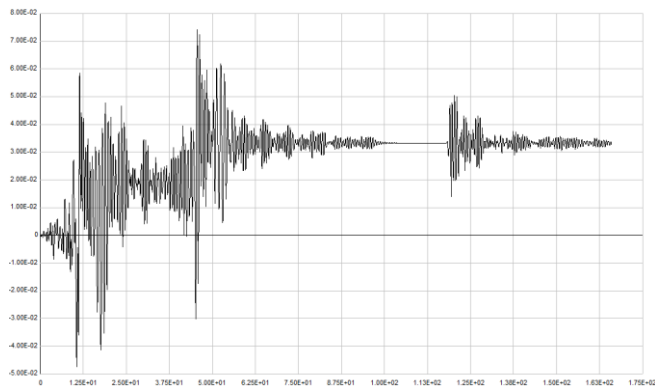
(g)



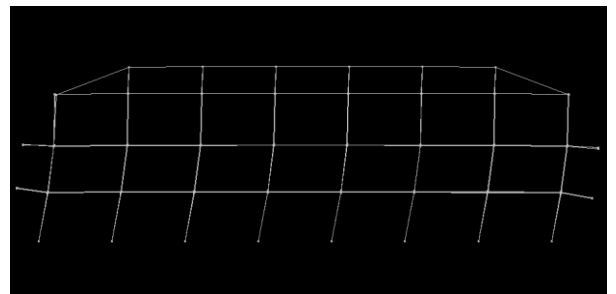
(g)

**Figura N°80:** Respuestas estructurales del segundo nivel del edificio 2H para todas las secuencias sísmicas (ajustado a un nivel de sismo frecuente en la dirección EW): (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.

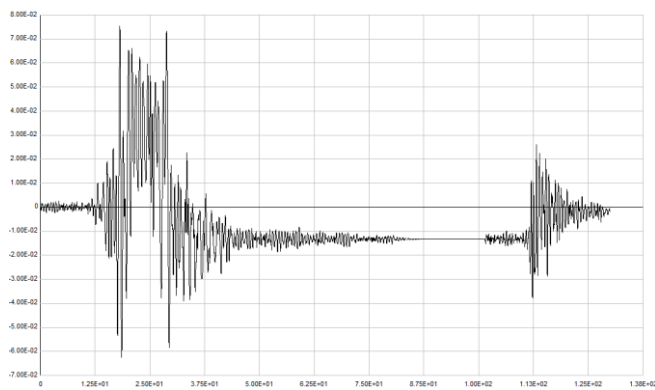
A continuación se comparan las respuestas estructurales del último nivel piso del edificio 4F para todos los registros sísmicos (ajustados a un nivel de sismo ocasional en la dirección NS).



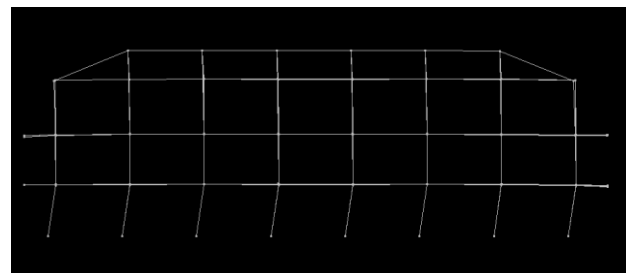
(a)



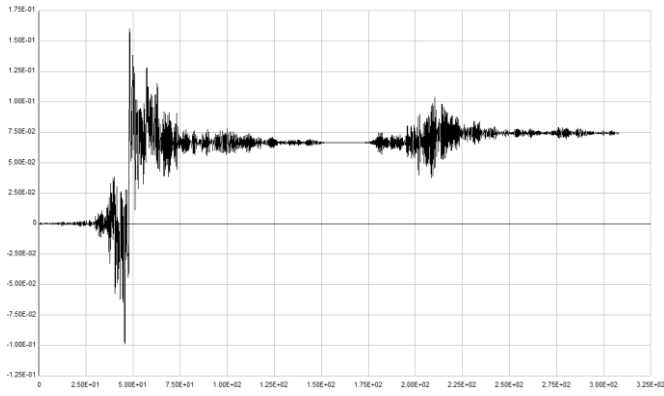
(a)



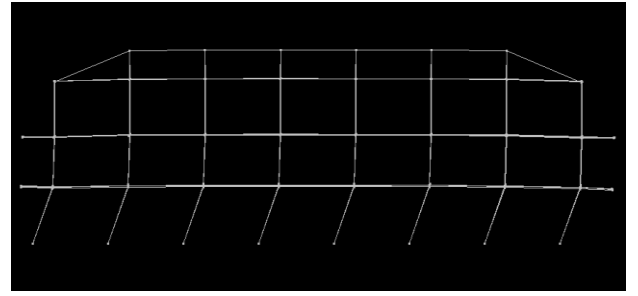
(b)



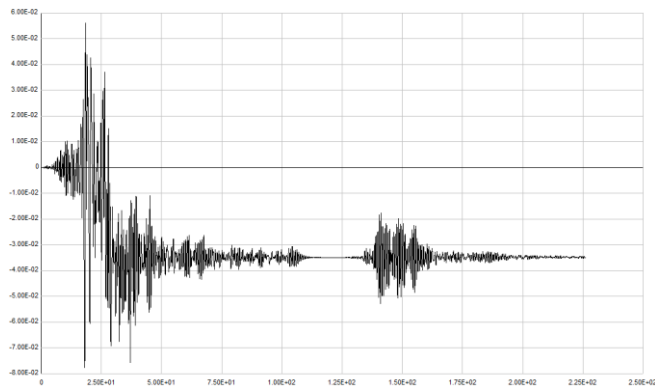
(b)



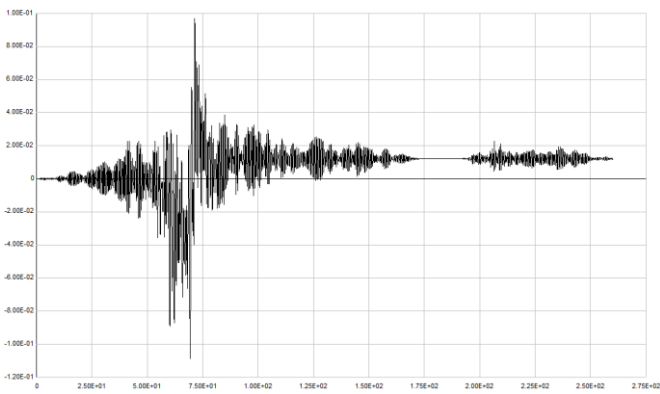
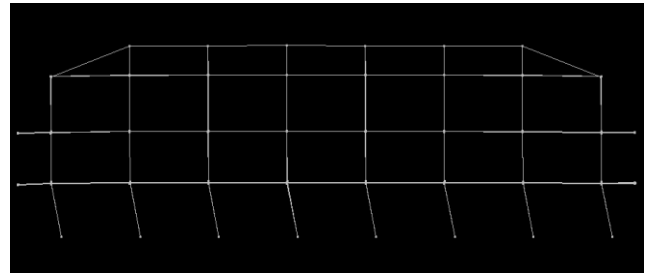
(c)



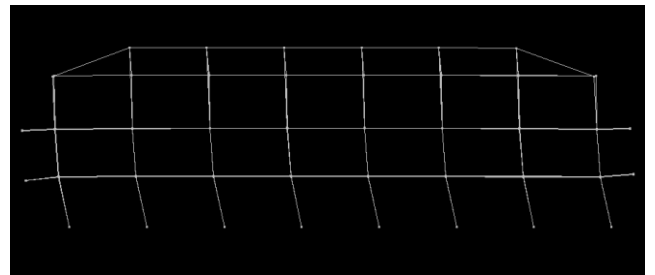
(c)



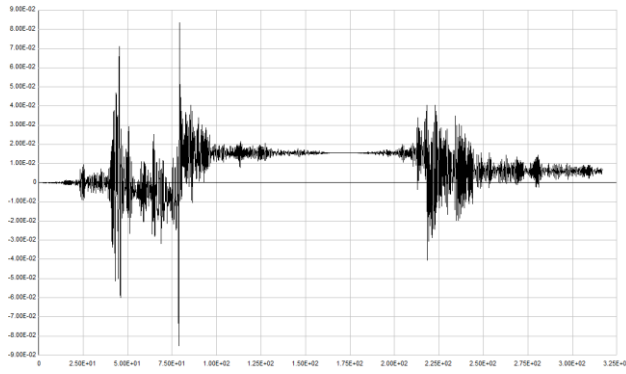
(d)



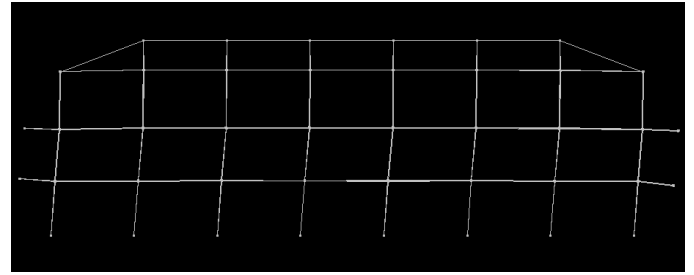
(e)



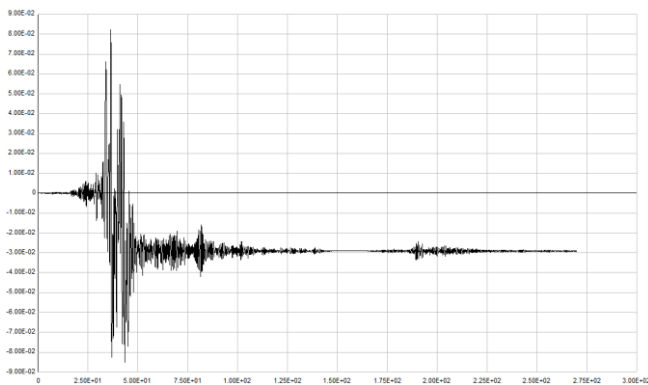
(e)



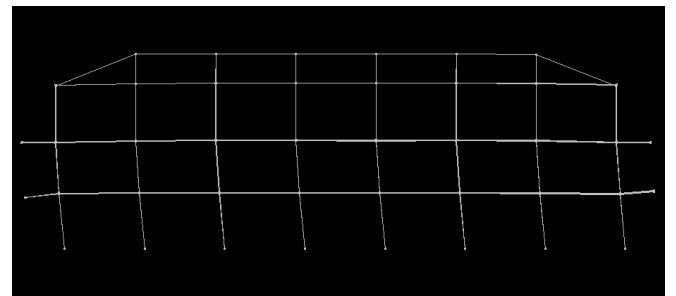
(f)



(f)



(g)



(g)

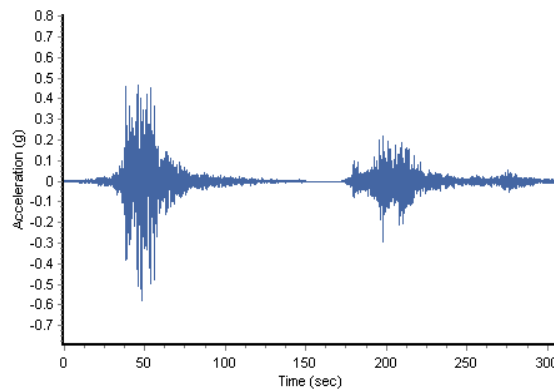
**Figura N°81:** Respuestas estructurales del segundo nivel del edificio 4F para todos los registros sísmicos (ajustado a un nivel de sismo ocasional I en la dirección NS): (a) Lima 1974, (b) Valparaíso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla (2007), (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015.

De acuerdo con la figura n°81 se observa la variación de los desplazamientos producidos por diferentes registros sísmicos usados en este estudio. Los desplazamientos máximos producidos por los registros de réplicas no son mayores a los desplazamientos producidos por el sismo principal.

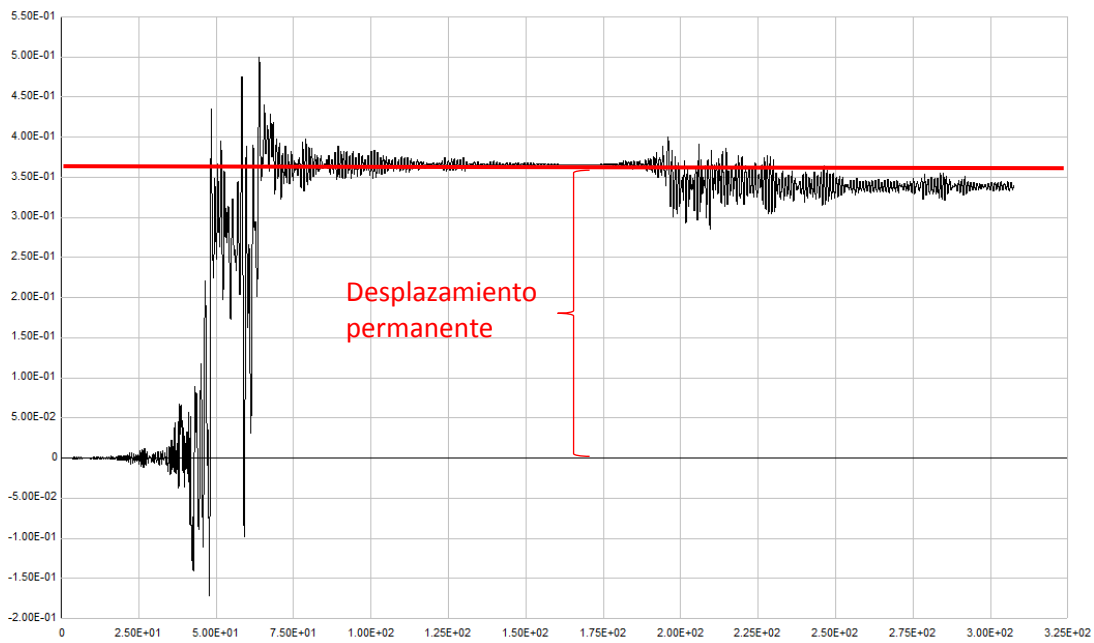
Por otro lado, para el evento sísmico muy raro es en donde se ha evidenciado con mayor claridad el efecto de las réplicas en los desplazamientos de entrepiso ambos edificios evaluados. Esto ocurre debido a que para este nivel de peligro sísmico la edificación se encuentra muy cerca del colapso, por lo que la estructura ha perdido su capacidad de soportar cargas. Debido a esto, después de ocurrido el evento principal, los registros de réplicas producirían mayores deformaciones y daño sobre la edificación.

Sin embargo es muy importante considerar qué tan grande es la réplica para que produzca estos efectos, ya que por ejemplo, el sismo de Arequipa 2001 no es lo suficientemente grande para producir mayores desplazamientos, a diferencia del sismo de Iquique 2014 que sí los produce.

Arequipa 2001



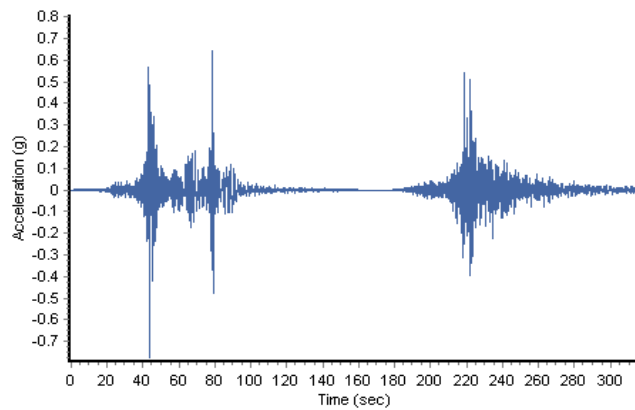
(a) Secuencia Sísmica



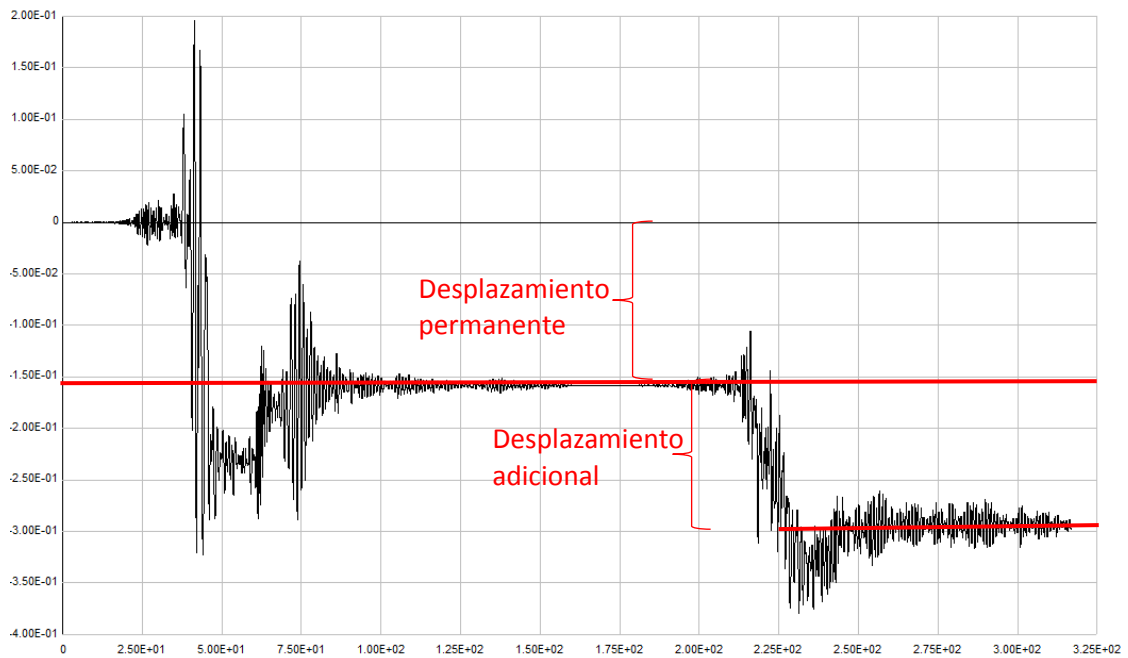
(a) Respuesta estructural

**Figura N°82 (a):** Ejemplo de la diferencia en la respuesta estructural obtenida para las secuencias sísmicas de (a) Arequipa 2001 y (b) Iquique 2014 en la dirección NS escaladas a un sismo muy raro en el edificio 2H. Secuencia de Arequipa 2001. Se observa que el tamaño de la réplica determina su efecto en la respuesta del edificio.

### Iquique 2014



(b) Secuencia sísmica



(b) Respuesta estructural

**Figura N°82 (b):** Ejemplo de la diferencia en la respuesta estructural obtenida para las secuencias sísmicas de (a) Arequipa 2001 y (b) Iquique 2014 en la dirección NS escaladas a un sismo muy raro en el edificio 2H. Secuencia de Arequipa 2014. Se observa que el tamaño de la réplica determina su efecto en la respuesta del edificio.

Según la figura N°82 los desplazamientos permanentes producidos por las secuencias sísmicas escaladas a un sismo de tipo muy raro son diferentes. En la secuencia Arequipa 2001 el registro de la réplica no es lo suficientemente grande como para producir mayores desplazamientos, por tanto el desplazamiento máximo lo produce el sismo principal. Por otro lado, para la secuencia sísmica de Iquique 2014 el registro de la réplica produce mayores desplazamientos permanentes.

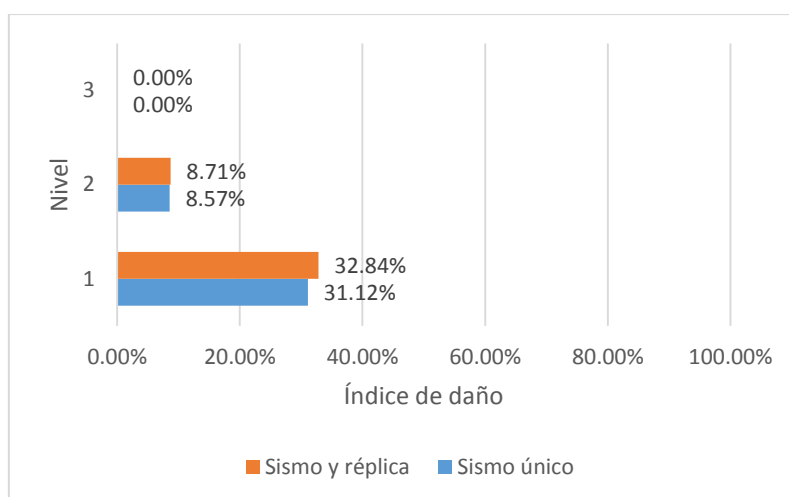
## 4.2 ÍNDICE DE DAÑO

Se han determinado los valores del índice de daño (DI) relacionando los valores de deformación y energía disipada en vigas y columnas correspondientes para las condiciones de eventos únicos y secuencias de sismos + réplicas, tomando en cuenta los cuatro niveles de peligro sísmico (frecuente, ocasional, raro y muy raro).

### 4.2.1 EDIFICIO 2H

#### A) SISMO FRECUENTE

##### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°83:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo con la Figura N°83 el índice de daño se incrementa en todos los niveles al incorporar réplicas en el análisis para la dirección NS. Es posible relacionar los valores del índice de daño obtenidos al desempeño alcanzado por la edificación en cada nivel:

**Tabla N°40:**

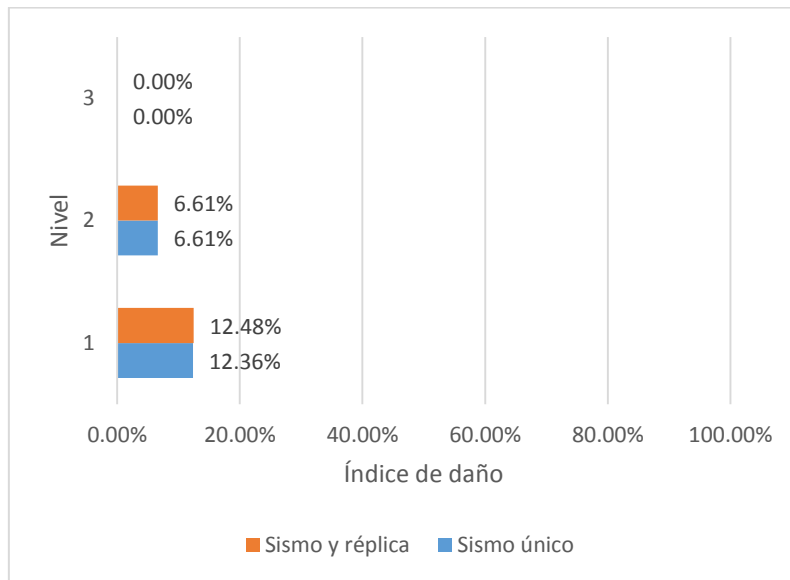
Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico frecuente** en dirección (NS) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>					X	X				
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Para las condiciones de sismo único y sismo + réplica se observa que el edificio 2H alcanza un desempeño de “seguridad de vida” en el primer nivel, un desempeño “funcional” en el nivel 02 y un nivel “operacional” en el nivel 03. Para este nivel de peligro sísmico (sismo frecuente) y en esta dirección (EW) no existe diferencias en el desempeño alcanzado al incorporar réplicas en el análisis.

**Dirección Este-Oeste (EW)**



**Figura N°84:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

La Figura N°84 muestra que el índice de daño es el mismo en la dirección EW para los casos de sismo único y sismo + réplica. Por tanto no se evidencian diferencias y el desempeño alcanzado sería el mismo en ambos casos.

**Tabla N°41:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico frecuente** en dirección (**EW**) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>			X	X						
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

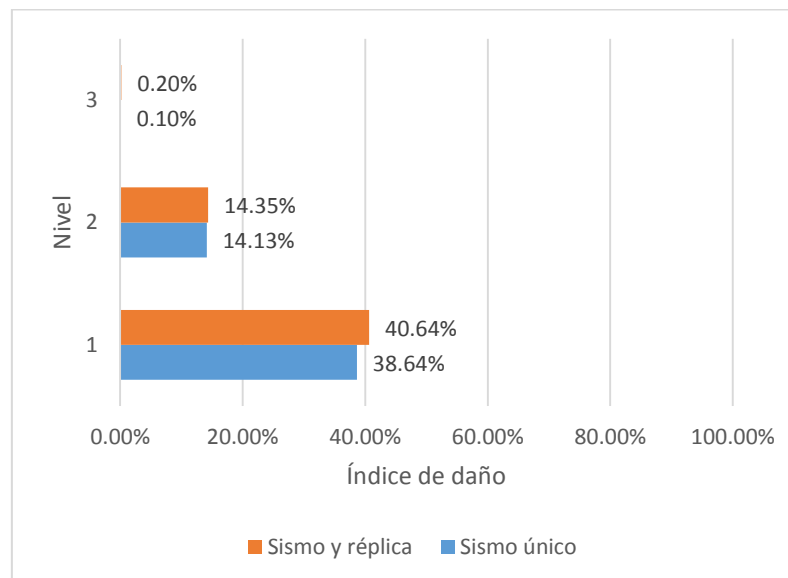
\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica



De acuerdo con la tabla n°41 para los eventos de sismo único y sismo + réplica el edificio 2H en la dirección EW alcanza un mejor desempeño que en la dirección NS, “funcional” en los dos primeros niveles y un desempeño “operacional” en el nivel 03.

## B) SISMO OCASIONAL

### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°85:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Según la Figura N°85 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis para la dirección NS. Este incremento es de 2% en el primer nivel y de 0.22% en el segundo nivel. Luego, es posible relacionar los valores del índice de daño obtenido al desempeño alcanzado por la edificación en cada nivel:

**Tabla N°42:**

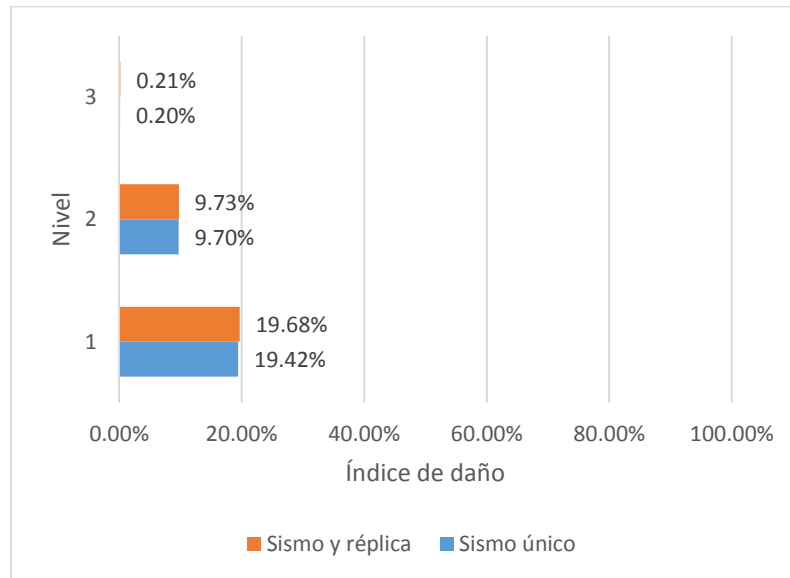
Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico ocasional** en dirección (NS) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>					X			X		
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Como se muestra en la tabla N°42 el edificio 2H alcanza un desempeño de “seguridad de vida” en el primer nivel para un sismo único, sin embargo ya alcanzaría un desempeño “cerca al colapso” al incluir réplicas pues el índice de daño es un poco mayor al 40%. Por otro lado, alcanza un desempeño funcional en el nivel 02 y un nivel operacional en el nivel 03.

### Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°86:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Como se observa en la Figura N°86 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis en la dirección EW, sin embargo este incremento es menos notorio que en la dirección NS, alrededor de 0.26% en el primer nivel y 0.03% en el segundo nivel.

**Tabla N°43:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico ocasional** en dirección (EW) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>			X	X						
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

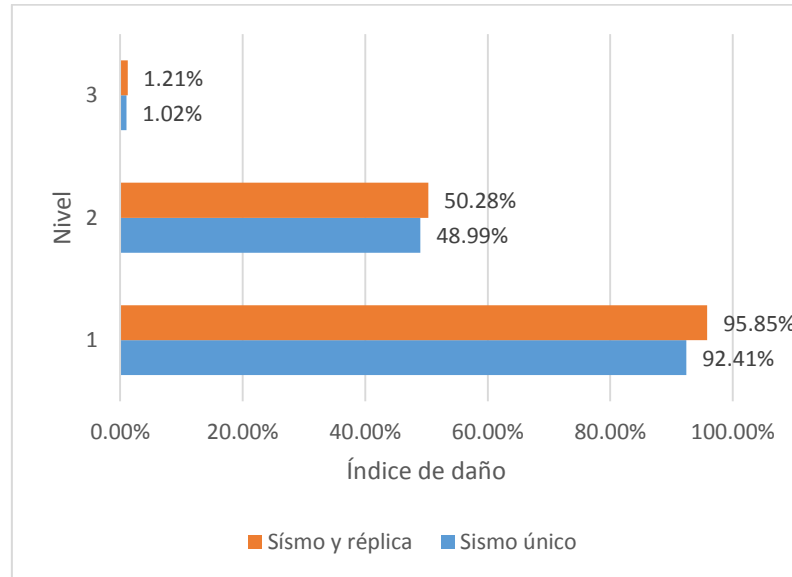
\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Para las condiciones de sismo único y sismo + réplica se observa que el edificio 2H en la dirección EW alcanza un mejor desempeño que en la dirección NS; “funcional” en los dos

primeros niveles y un desempeño “operacional” en el nivel 03. Para este nivel de peligro sísmico (sismo ocasional) y en esta dirección (EW) no existe diferencias en el desempeño alcanzado al incorporar réplicas en el análisis.

### C) SISMO RARO

#### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°87:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo con la Figura N°87 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis en la dirección NS. Este incremento es de 3.43% en el primer nivel y 1.29% en el segundo nivel. Es posible relacionar los valores del índice de daño obtenido al desempeño alcanzado por la edificación en cada nivel:

**Tabla N°44:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico raro** en dirección (NS) según índice de daño

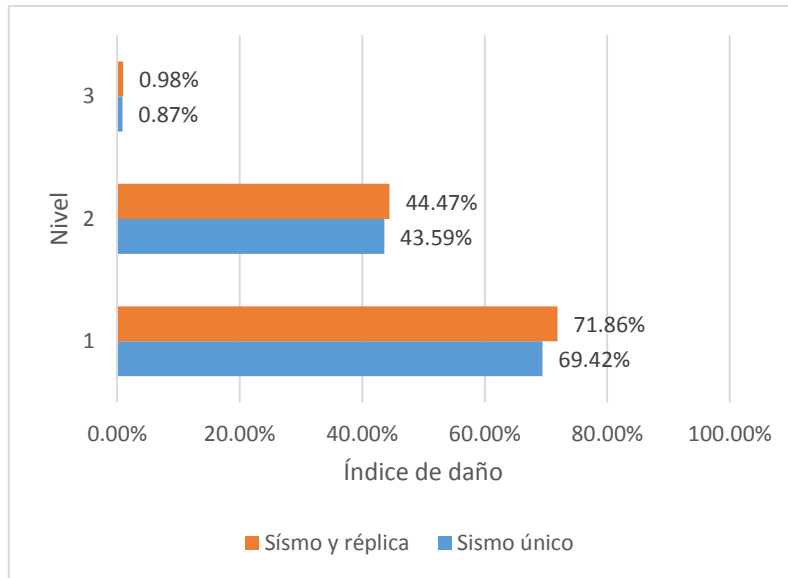
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Como muestra la tabla n°44 el edificio 2H alcanza un desempeño cercano al colapso en el primer nivel para un sismo único y el mismo desempeño se alcanzaría para un sismo + réplica.

En el nivel 02 alcanza también un desempeño cercano al colapso y un nivel operacional en el nivel 03.

**Dirección Este-Oeste (EW)**



**Figura N°88:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (**EW**), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Según la Figura N°88 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis en la dirección EW. En el primer nivel el índice de daño se incrementa en 2.44%, en el segundo nivel 0.88%. Luego es posible relacionar los valores del índice de daño obtenido al desempeño alcanzado por la edificación en cada nivel:

**Tabla N°45:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico raro** en dirección (EW) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

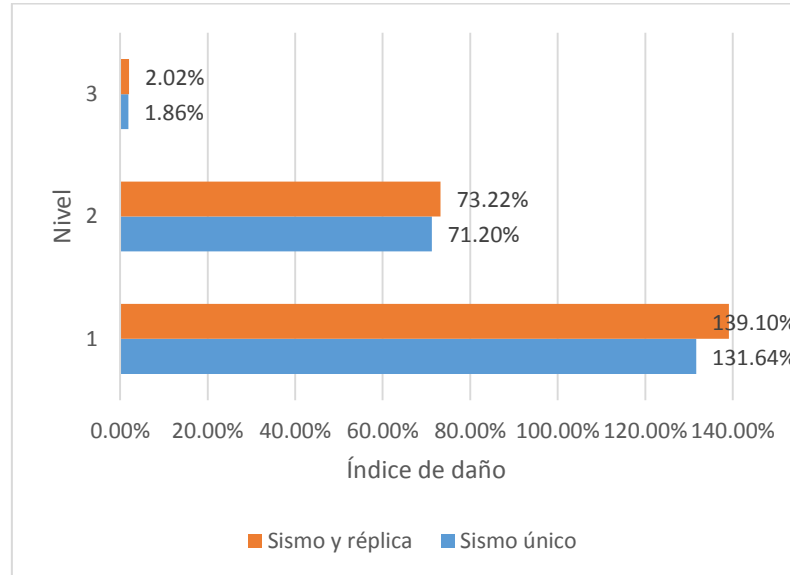
\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Par un evento de sismo raro el edificio 2H alcanza un nivel de desempeño “cerca al colapso” para los dos primeros niveles. Es evidente, de acuerdo a la figura N°89 que la incorporación de

réplicas en el análisis incrementa el índice de daño obtenido, sin embargo este incremento no es mayor al 5% y por tanto el desempeño no cambia.

### D) SISMO MUY RARO

#### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°89:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo con la Figura N°89 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis en la dirección NS. En el primer nivel el incremento es de 7.46% y en el segundo nivel es de 2.02%. Al relacionar los valores del índice de daño obtenido al desempeño alcanzado por la edificación en cada nivel:

**Tabla N°46:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico muy raro** en dirección (NS) según índice de daño

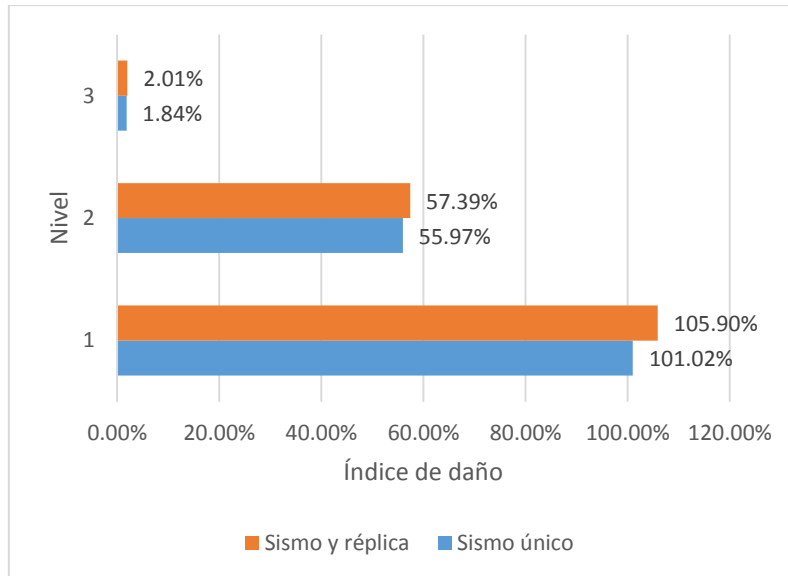
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>									X	X
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Según la tabla n°46 el edificio 2H alcanza un desempeño de “colapso” en el nivel 01 para un evento de sismo único y un evento de sismo + réplica. En estas condiciones el edificio ha

perdido su capacidad de carga y resistencia y no puede ser reparado. Como el colapso es progresivo, en el nivel 02 alcanza un desempeño de “cerca al colapso” y un nivel “operacional” en el nivel 03.

### Dirección Este-Oste (EW)



**Figura N°90:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 2H, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

La Figura N°90 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis en la dirección EW en todos los niveles, haciéndose más notorio en el nivel 01 y 02. En el nivel 01 el incremento es de 4.70% y en el nivel 02 el incremento es de 1.42%. Si se relacionan los valores del índice de daño obtenido al desempeño alcanzado por la edificación en cada nivel, se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla N°47:**

Desempeño alcanzado por edificio 2H para un nivel de peligro **sísmico muy raro** en dirección (EW) según índice de daño

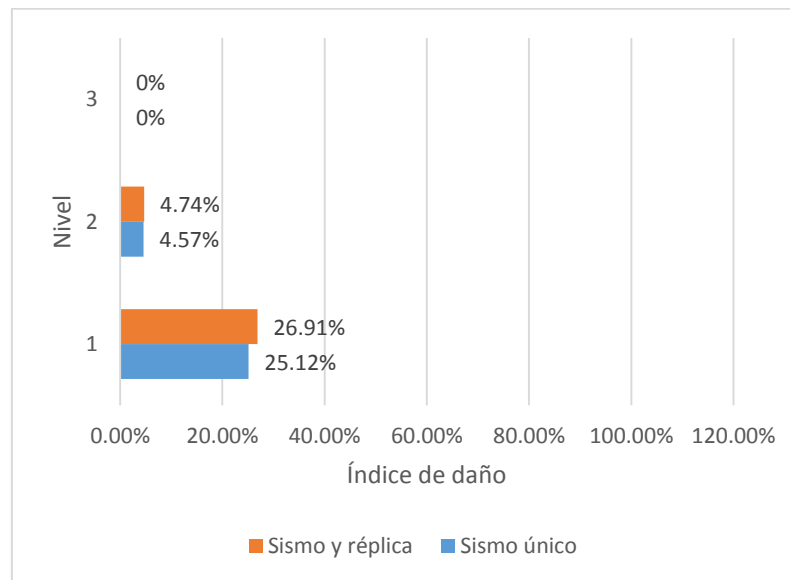
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X			X
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Según la tabla N°47 para un evento de sismo muy raro el edificio 2H alcanza un nivel de desempeño de “cerca al colapso” para sismo único, pero alcanzaría estado de “colapso” si ocurriese una réplica, esto debido a que el incremento en el índice de daño supera el 100%. En el nivel 02 el desempeño es “cerca al colapso” en ambos casos y en el tercer nivel es “operacional”.

#### 4.2.2 EDIFICIO 4F

##### A) SISMO FRECUENTE Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°91:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Según se observa en la Figura N°91, el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis. El mayor incremento se produce en el primer nivel con 1.79%. En los otros niveles el aumento es mínimo.

**Tabla N°48:**

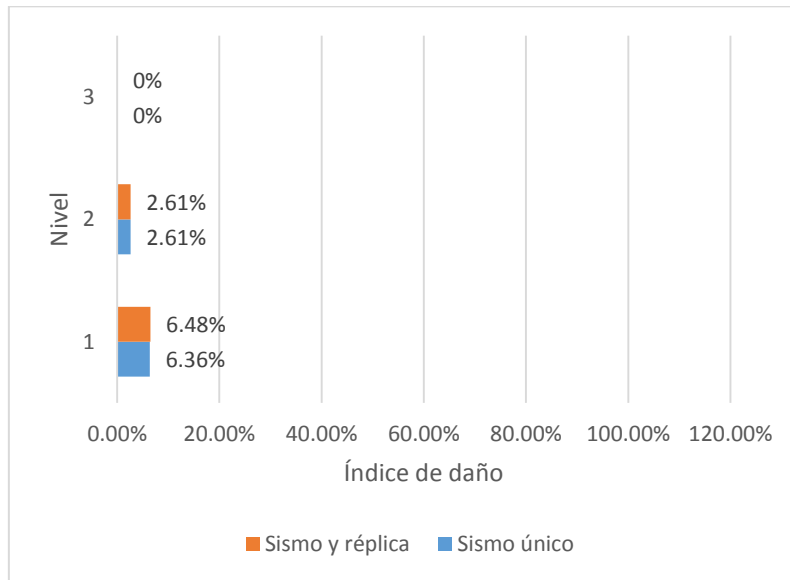
Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico frecuente** en dirección (EW) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>				X		X				
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Para las condiciones de sismo único se observa que el edificio 4F alcanza un desempeño “funcional” en el primer nivel, pero para la condición de sismo + réplica este alcanza un desempeño de “seguridad de vida” ya que es mayor al 25%. Para las dos condiciones alcanza un desempeño “funcional” en el nivel 02 y “operacional” en el nivel 03.

**Dirección Norte-Sur (NS)**



**Figura N°92:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Frecuente** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo con la Figura N°92 la incorporación de réplicas en el análisis no produce un incremento considerable en el índice de daño.

**Tabla N°49:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico frecuente** en dirección (NS) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>	X	X								
<b>Nivel 02</b>	X	X								
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

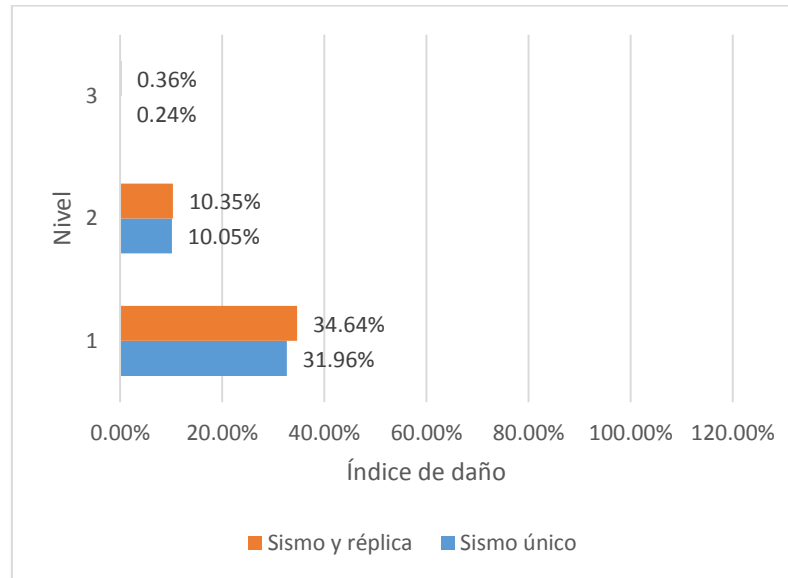
Según la tabla N°49 para las condiciones de sismo único y sismo + réplica se observa que el edificio 4F en la dirección NS alcanza un mejor desempeño que en la dirección EW; siendo



este “operacional” en todos los niveles. Para este nivel de peligro sísmico (sismo frecuente) y en esta dirección (NS) no existe diferencias en el desempeño alcanzado al incorporar réplicas en el análisis.

## B) SISMO OCASIONAL

### Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°93:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en el edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Como se observa en la Figura N°93 el índice de daño se incrementa para el evento de sismo y réplica respecto al evento de sismo único. En el primer nivel el incremento es de 2.68% y en el segundo nivel es de 0.30%.

**Tabla N°50:**

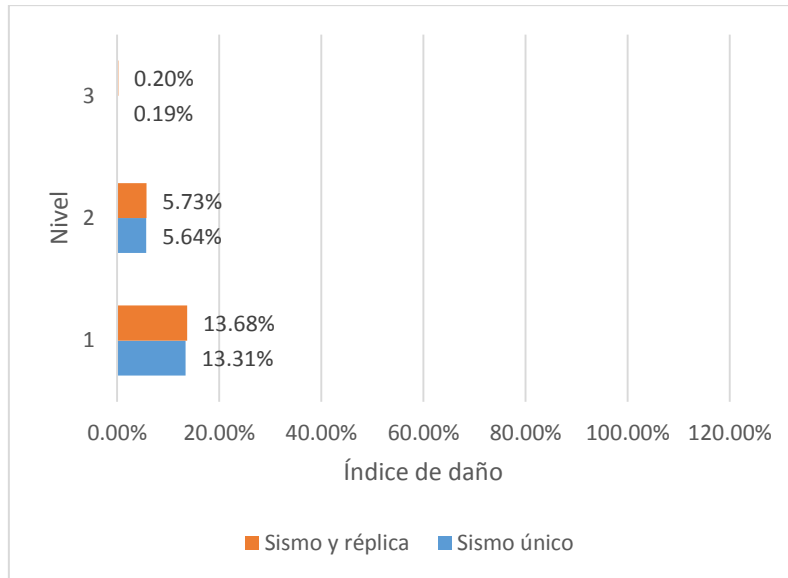
Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico ocasional** en dirección (EW) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>					X	X				
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

De acuerdo a la tabla n°50 el edificio 4F alcanza un desempeño de “seguridad de vida” en el primer nivel, un desempeño “funcional” en el nivel 02 y “operacional” en el nivel 03. No existen diferencias en el desempeño al incorporar el efecto de réplicas

**Dirección Norte-Sur (NS)**



**Figura N°94:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Ocasional** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo con la Figura N°94 el índice de daño no se incrementa al incorporar réplicas en el análisis. En el primer nivel el incremento es de 0.37% y en el segundo nivel 0.11%. Luego es posible relacionar los valores del índice de daño obtenido al desempeño alcanzado por la edificación en cada nivel:

**Tabla N°51:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico ocasional** en dirección (NS) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>			X	X						
<b>Nivel 02</b>			X	X						
<b>Nivel 03</b>	X	X								

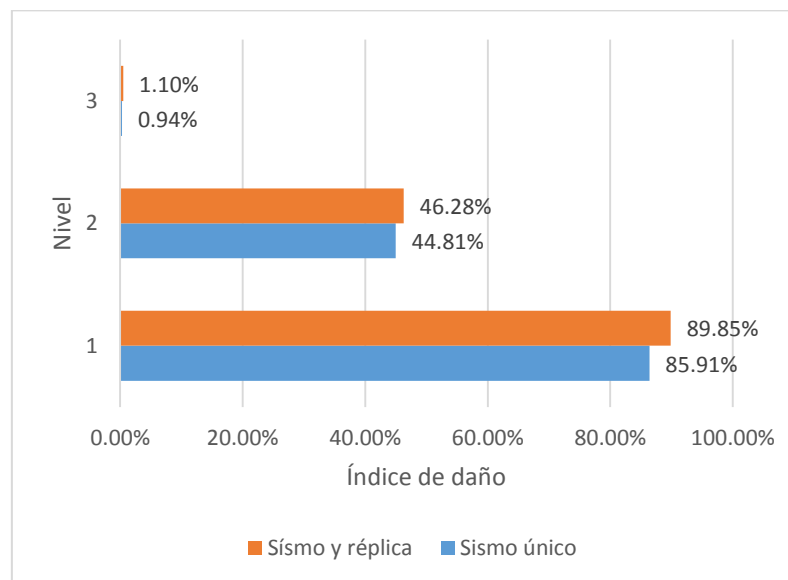
\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Para las condiciones de sismo único y sismo + réplica se observa que el edificio 4F en la dirección NS alcanza un mejor desempeño que en la dirección EW; “funcional” en los dos primeros niveles y un desempeño operacional en el nivel 03.

Para este nivel de peligro sísmico (sismo ocasional) y en esta dirección (NS) no existe diferencias en el desempeño alcanzado al incorporar réplicas en el análisis.

### C) SISMO RARO

#### Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°95:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Como muestra la Figura N°95 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis. Este incremento es de 3.64% en el primer nivel y de 1.47% en el segundo nivel.

**Tabla N°52:**

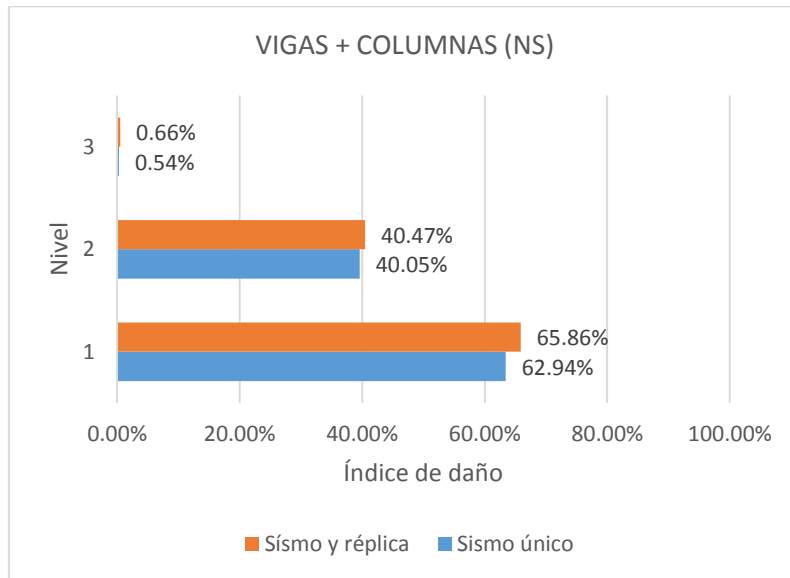
Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico raro** en dirección (EW) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

De acuerdo a la tabla n°52 el edificio 4F alcanza un desempeño de “cerca al colapso” en el primer nivel para un sismo único y el mismo desempeño se alcanzaría para un sismo + réplica. En el nivel 02 alcanza también un desempeño “cerca al colapso” y un nivel “operacional” en el nivel 03.

**Dirección Norte-Sur (NS)**



**Figura N°96:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Raro** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

Según la Figura N°96 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis, en 2.92% en el primer nivel y 0.42% en el segundo nivel.

**Tabla N°53:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico raro** en dirección (NS) según índice de daño

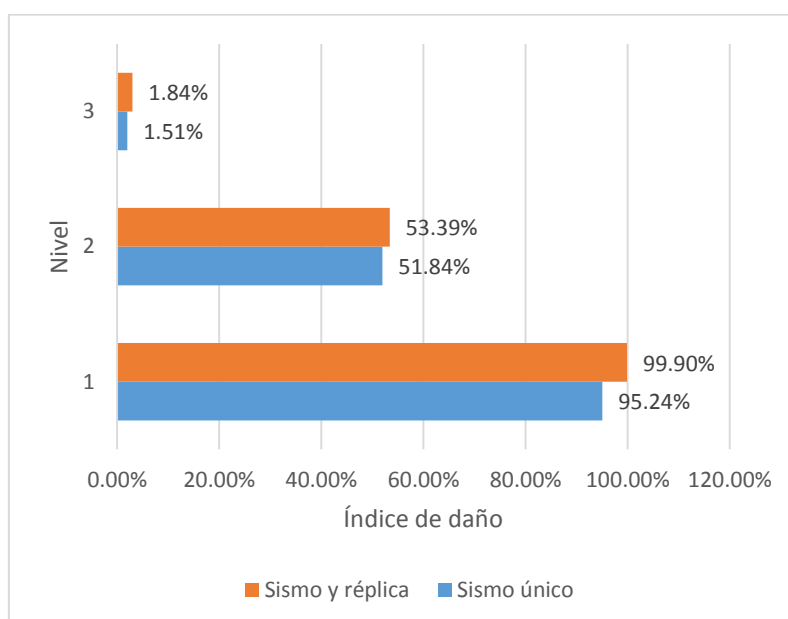
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X	X		
<b>Nivel 02</b>					X	X				
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

De acuerdo con la tabla n°53 para un evento de sismo raro el edificio 2H alcanza un nivel de desempeño “cerca al colapso” para el primer nivel y “seguridad de vida” en el segundo nivel. No existen diferencias en el desempeño al incorporar réplicas en el análisis.

## D) SISMO MUY RARO

### Dirección Norte-Sur (NS)



**Figura N°97:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (NS), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

La Figura N°97 muestra que el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis. El índice de daño se incrementa en 4.66% en el primer nivel y 1.55% en el segundo nivel. Luego es posible relacionar los valores del índice de daño obtenido al desempeño alcanzado por la edificación en cada nivel:

**Tabla N°54:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **muy raro** en dirección (NS) según índice de daño

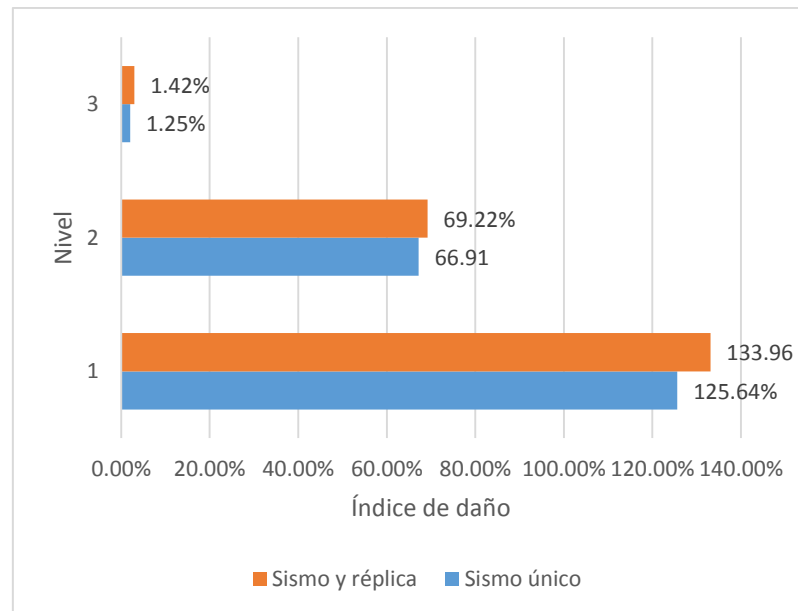
	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>							X			X
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

Par un evento de sismo muy raro el edificio 4F alcanza un nivel de desempeño de “cerca al colapso” para sismo único y “colapso” si ocurriese una réplica, esto debido al incremento en el

índice de daño que alcanza el 100%. En los otros niveles el desempeño es el mismo para ambos casos, “cerca al colapso” en el segundo nivel y “operacional” en el primer nivel.

### Dirección Este-Oeste (EW)



**Figura N°98:** Índice de daño combinado (vigas y columnas) en edificio 4F, para un nivel de peligro sísmico de **Sismo Muy Raro** en dirección (EW), obtenidos para eventos únicos e incorporando réplicas.

De acuerdo con la Figura N°98 el índice de daño se incrementa al incorporar réplicas en el análisis. Este incremento es mayor en el primer nivel, 8.32% evidenciando que este sufre los mayores daños. En el segundo nivel el incremento es de 2.31%.

**Tabla N°55:**

Desempeño alcanzado por edificio 4F para un nivel de peligro **sísmico muy raro** en dirección (EW) según índice de daño

	Operacional		Funcional		Seguridad de Vida		Cerca al Colapso		Colapso	
	<10%		10% a 25%		25% a 40%		40% a 100%		100%<	
	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R	S	S+R
<b>Nivel 01</b>									X	X
<b>Nivel 02</b>							X	X		
<b>Nivel 03</b>	X	X								

\*S: sismo único, S+R: sismo +réplica

De acuerdo a la tabla n°55 el edificio 4F alcanza un desempeño de “colapso” en el primer nivel. En el nivel 02 alcanza un desempeño de “cerca al colapso” y “operacional” en el nivel 03. No existen diferencias en el desempeño alcanzado para sismos únicos e incorporando réplicas.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- La incorporación de réplicas en la evaluación sísmica de los edificios 2H y 4F, aunque produce cambios en los parámetros de demanda, estos no son significativos en el desempeño de ambos edificios.
- No existe un incremento considerable del desplazamiento y derivas de entrepiso cuando se incorpora el efecto de réplicas en la evaluación. En ambos edificios se han evidenciado cambios en los desplazamientos en la dirección de análisis más larga para un sismo de tipo raro (periodo de retorno 475 años) y muy raro (periodo de retorno 970 años). El edificio 2H sufre un incremento de 0.10% en el segundo nivel para un sismo raro y un incremento de 0.40% en el primer nivel para un sismo muy raro. El edificio 4F sufre un incremento en sus derivas de 0.09% en el primer nivel para un sismo raro y 0.16% en el primer nivel para un sismo muy raro. Sin embargo, estos incrementos no son suficientes para cambiar su desempeño. Por otro lado, para los sismos de tipo “frecuente” (periodo de retorno 43 años) y ocasional (periodo de retorno 72 años) los desplazamientos y derivas máximas no sufren cambios al incorporar réplicas.
- Los valores del índice de daño se incrementan para todos los casos cuando se incorpora réplicas en la evaluación. Este incremento es más grande en los dos primeros niveles para la dirección de análisis más larga (NS en el edificio 2H y EW en el edificio 4F), y se hace más evidente para el sismo raro y muy raro: para el sismo raro, en el edificio 2H el índice de daño se incrementa 2.00% en el primer nivel y 0.22% en el segundo nivel, en el edificio 4F se incrementa en 3.64% en el primer nivel y 1.47% en el segundo nivel; para el sismo muy raro el índice de daño se incrementa en 7.45% en el primer nivel y 2.02% en el segundo nivel para el edificio 2H, y en 8.32% en el primer nivel y 2.31% en el segundo nivel para el edificio 4F. Esto indica que ambas edificaciones sufren mayores daños con secuencias de sismos y réplicas que con sismos únicos. Sin embargo, el incremento no llega a más del 10% en todos los casos. Al determinar el desempeño, este se reduce en la dirección EW del edificio 2H y NS del edificio 4F para algunos sismos. En las otras direcciones de análisis no existen cambios en el desempeño.

- A diferencia de los resultados obtenidos en investigaciones anteriores, Orrillo (2014) y Bolaños (2015) para el sismo de diseño (sismo raro), ambos edificios, 2H y 4F, no alcanzan un nivel de desempeño aceptable, y llegan a estar en un nivel “cerca al colapso”. De acuerdo a las derivas de entrepiso obtenidas, ambos edificios se desplazarían más allá de su capacidad en el primer nivel, por lo que colapsarían por la formación de un mecanismo de piso blando.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- En futuras investigaciones se recomienda estudiar relaciones entre el tamaño de los registros principales y las réplicas, y establecer hasta qué nivel estas relaciones influyen en los parámetros de demanda. Como se ha mostrado al comparar las respuestas estructurales para los registros de Arequipa 2001 e Iquique 2014, las dimensiones de los registros de réplicas determinan el cambio de respuesta estructural al incorporarlas en la evaluación sísmica.
- Se recomienda realizar otros estudios en estructuras no diseñadas bajo criterios sismo resistentes, como viviendas o edificios antiguos. Por tanto que los resultados obtenidos en esta investigación son preliminares, es decir, no se pueden generalizar para todas las estructuras de concreto armado.
- El efecto de la interacción suelo-estructura no se ha considerado en este estudio. Esta es una variable que debería estudiarse en otras investigaciones, de tal forma que los resultados que se obtengan sean más cercanos a la realidad.
- En esta investigación solo se han considerado daños a elementos estructurales, la estimación del daño en elementos no estructurales producido por el efecto de réplicas debe ser motivo de otras investigaciones debido que estos elementos son de vital importancia para la funcionalidad de las edificaciones.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

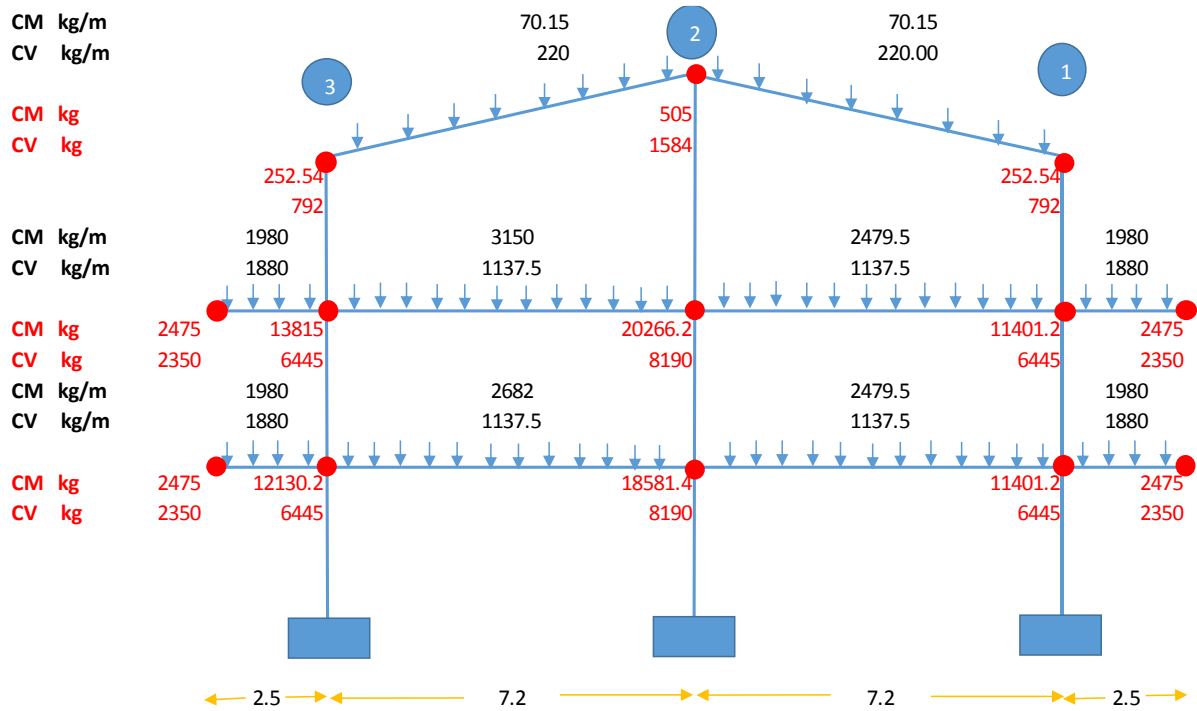
- Abrahamson, N. y Atik, L. 2010. An improved method for nonstationary spectral matching. *Earthquake Spectra*. Vol. 26. 601-617.
- Admuthe, S. 2018. Semi-rigid steel frames subjected to mainshock aftershock earthquake sequences. Thesis Master of Science. Colorado State University. Consultado 18 en. 2019. Disponible: [https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/189411/Admuthe\\_colostate\\_0053N\\_14795.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/189411/Admuthe_colostate_0053N_14795.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Aguiar F. 2004. Espectros sísmicos de riesgo uniforme para verificar desempeño estructural en países sudamericanos. IMME, Caracas. V2,n1, p29-49. Disponible: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0376-723X2004000100002](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2004000100002)
- Alarcón, J., Taucer, F., y So, E. 2008. The 15 august 2007 Pisco, Peru, Earthquake-Post-earthquake field survey. The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering.
- Alva, J. y Castillo, J. 1994. Peligro sísmico en el Perú. Tesis Ing. Civil. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Antayhua, Y. et al. 2002. Análisis espacial de las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 a partir de datos de una red sísmica local. Centro Nacional de Datos Geofísicos. Pp. 47-58.
- ASCE (American Society of Civil Engineer). 2017. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. ACSE 41-17 Standard. Virginia. Estados Unidos
- ASCE (American Society of Civil Engineer). 2017. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. ACSE 7-16 Standard. Virginia. Estados Unidos
- Bernal, I. et. al. 2014. Re-evaluación del peligro sísmico probabilístico para el Perú. Lima, Perú.
- Bilek, S. y Ruff, L. 2002. Analysis of 23 June 2001 Mw=8.4 underthrusting earthquake and its aftershocks. *Geophysical research letters*. Vol. 29. No 20.
- Bolaños, M. 2015. Desempeño sismorresistente del edificio 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca. Tesis Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Buforn, E. y Tavera, H. 2001. Source mechanism of earthquakes in Perú. *Journal of Seismology*. 5: 519-539.
- Casimiro, S. 2012. Desempeño Sísmico de edificaciones bajo el sismo de nivel ocasional. Tesis Maestro en Ciencias. Universidad Nacional de Ingeniería.

- Chacón, R. y Paz, I. 2016. Análisis de desempeño sísmico de los edificios escolares típicos 780 post 97 de la costa peruana. Tesis. Magister en Ingeniería Civil. PUCP
- Chopra, A. 2014. Dinámica de Estructuras. 4 ed. Murieta A, (trad.). México. Pearson Educación.
- CSI. 2018. Sap2000. Version 20. Computers and Structures. Berkley. California.
- CSI. 2011. Perform 3D: Nonlinear Analysis and Performance Assesment for 3DStructures. Version 7. Computers and Structures. Berkley. California.
- 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.
- Delouis, B. et al. 2009. The Mw 7.7 Tocopilla Earthquake of 14 November 2007 at the Southern Edge of the Northern Chile Seismic Gap: Rupture in the Deep Part of the Coupled Plate Interface. Bulletin of Seismological Society of America. Vol 99, No. 1 pp.87-94.
- Dieterich, J. 1972. Time-Depend Friction as a Possible Mechanism for Aftershocks. Journal of Geophysical Research. Vol. 77, No. 20.
- Duerr, K. 2010. Seismic Vulnerability Assessment and Retrofit Optimization of Non-Code Conforming Buildings with Consideration of Mainshock-Aftershock Earthquake. Thesis Master of Sciencie. Okanagan. The University of British Columbia.
- Elnashai, A. et al. 2011. The Maule (Chile) earthquake of February 27, 2010: Consequence assessment and case studies. Mid-America Earthquake (MAE) Center. Research Report 10-04. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Gálvez, V. 2011. Evaluación del desempeño sismoresistente usando análisis no lineal en el tiempo. Tesis Ing. Civil. Lima. PUCP.
- Ghobarah, A. 2001. Performance-based design in earthquake engineering: state of development. Elsevier. Engineering Strutures 23 878-884.
- Goda, K. et al. 2013. Aftershock Statistics of Major Subduction Earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America. 103. 3222-3234. 10.1785/0120120337.
- Gupta, V. y Das, S. 2010. Scaling of Response Spectrum and Duration for Aftershocks. Elsevier. Vol. 30. Pp. 724-735
- Han, R. et al. 2014. Assessment of Seismic Performance of Buildings with Incorporation of Aftershocks. Journal of Seismic Performance of Constructed Facilities. 29. 04014088. 10.10641/(ACSE)CF.1943-5509.0000596

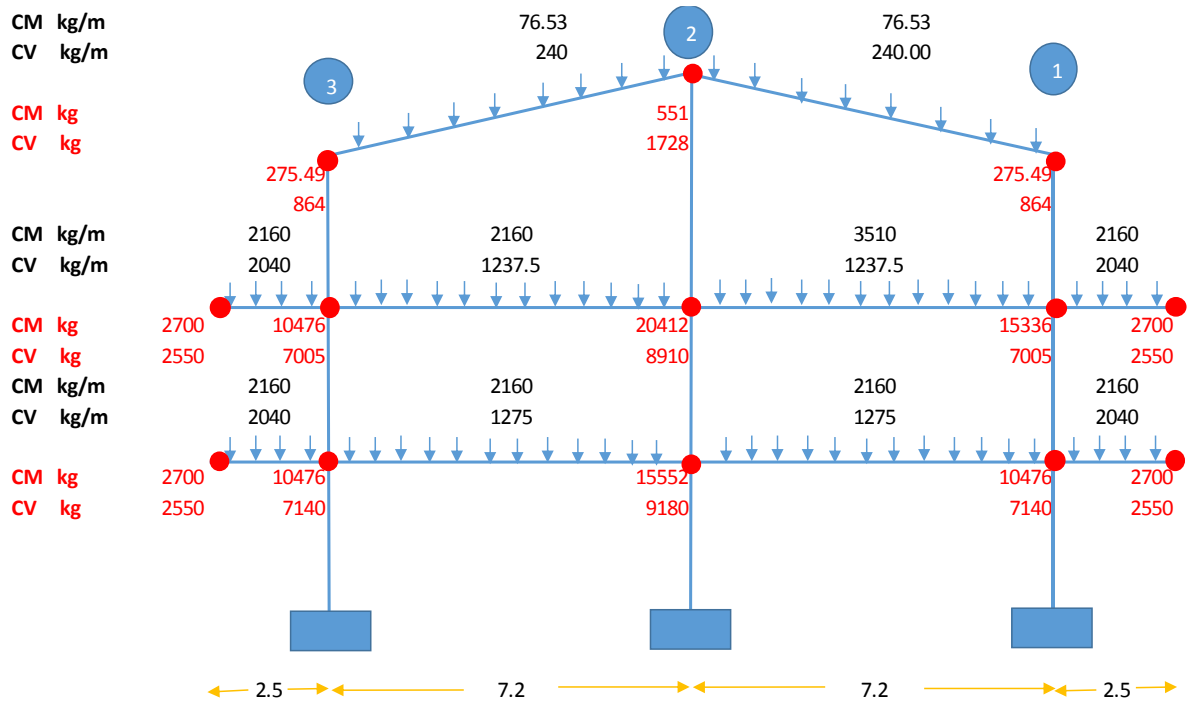
- Hatzigeorgiou, G., Liolios, A. 2010. Nonlinear behaviour of RC frames under repeated strong ground motions. Elsevier. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 30 1010–1025.
- Huang, W. et. al. 2012. Damage Assesment of RC Frame Structures under Mainshock-Aftershock Seismic Sequences. Tongji University. China
- ICG (Instituto de la Construcción y Gerencia). 2018. Diseño Sismoresistente. Norma E.030. Lima. Perú.
- IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology). 2015. Buildings in Earthquakes: Why do some fall and others don't? (en línea video). Washinton D.C. Estados Unidos. 5min. 31 seg. Consultado 31 agos. 2019. Disponible en: [https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/building\\_resonance\\_the\\_resonant\\_frequency\\_of\\_different\\_seismic\\_waves](https://www.iris.edu/hq/inclass/animation/building_resonance_the_resonant_frequency_of_different_seismic_waves)
- Jeon, E. et.al. 2012. Aftershock fragility curves for damaged non-ductile reinforced concrete buildings. Proc., World Conference on Earthquake Engineering. International Association for Earthquake Engineering IAEE. Tokyo, Japan.
- Kelleher, A. 1972. Rupture zone of large South American earthquakes and some predictions, J. Geophys. Res. 77, 2087-2103.
- Kramer, S. 1996. Geotechnical Eartquake Engineering. Ney Jersey. USA. Prentice Hall.
- Langer, C. y Spence, W. 1995. The 1974 Perú Earthquake Series. Bulletin of the Seismological Society of América. Vol.85, No 3, pp. 665-687.
- Madariaga, R. 1998. Sismicidad de Chile. Département de Sismologie. Université Denis Diderot de Paris.
- Mamum, A. y Saatcioglu, M. 2017. Seismic performance evaluation of moderately ductile RC frames structures using PERFORM-3D. 16th World Conference on Earthquake. Santiago. Chile.
- Mander, et al. 1988. Theoretical stress-strain model for confined concrete. Journal of Structural Engineering. Vol. 114. No 8. Pp. 1804-1826
- MVCS (Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento). Norma Técnica E.030 Diseño Sismoresistente. Lima, Perú.
- Orrillo, R. 2014. Desempeño sismorsistente del edificio 2H de la Universidad Nacional de Cajamarca. Tesis Ingeniero Civil
- Otani, S. 1980. Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Building Structures. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 333 - 344.

- Park et al. (1985). Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings. *J Struct Eng.* 111. Pp. 740-757
- PEER/ATC (Pacific Earthquake Engineering Research Center/ Applied Technology Council).2010. Modelling and acceptance criteria for seismic design and analysis of tall buildings. PEER/ATC 72-1 Report. California, Estados Unidos.
- Raghunandan et al. 2014. Aftershock collapse vulnerability assessment of reinforced concrete frame structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics.* DOI: 10.1002/eqe.2478.
- Rezaei, E. y Massumi, A. 2014. Seismic performance of reinforced concrete frame buildings designed by Iranian Seismic code. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering.* Vol.16 No.3
- Ruff, L. y Beck, S. 1989. Great earthquakes and subduction along the Peru trench. *Physics of earth and Planetary Interiors.* Vol. 57, pp 199-224.
- Seismosoft. 2016. Earthquake Engineering Software Solutions. Seismomatch.
- Shcherbakov et al. 2013. Aftershocks statistics of major subduction earthquakes. *Bulletin of Seismological Society of America.* Vol. 103. No. 6 pp3222-3234
- Shokrabadi, M., y Burton, H. 2018. Risk-based assessment of aftershock and mainshock-aftershock seismic performance of reinforced concrete frames. Elsevier. *Structural Safety* 73 (2018) 64-74.
- Spence, W. y Langer, C. 1995. The 1994 earthquake series. *Bulletin of Seismological Society of America.* Vol. 85. No. 3, pp. 665-687.
- Stern, R. 2002. Subduction Zones. *Geophysics.*
- Sucuogluo, H., Akkar, S. 2014. *Basic Earthquake Engineering. From Seismology to Analysis and Design.* Switzerland. Springer.
- Tavera, H. y Bernal, I. 2005. Distribución especial de áreas de ruptura y lagunas sísmicas en el borde oeste de Perú. Instituto Geofísico del Perú.
- Tavera, H. et al. 2002. El Terremoto de la Región Sur de Perú del 23 de Junio de 2001: Aspectos Sismológicos. Centro Nacional de Datos Geofísicos. Pp. 19-30.
- Tavera, H. et al. 2007. El sismo de Pisco del 15 de Agosto, 2007 (7.9Mw) Departamento de Ica Perú. Instituto Geofísico del Perú. Informe Preliminar. Lima, Perú.

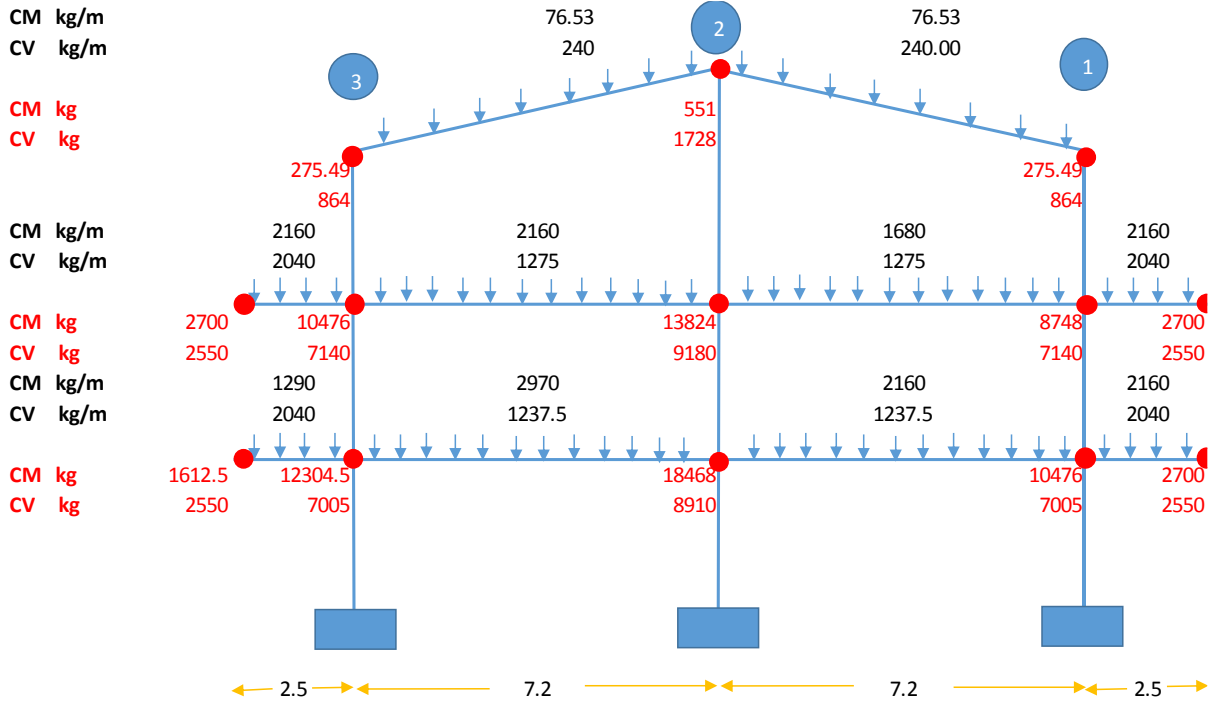
## ANEXO 01: METRADO DE CARGAS Y MASAS



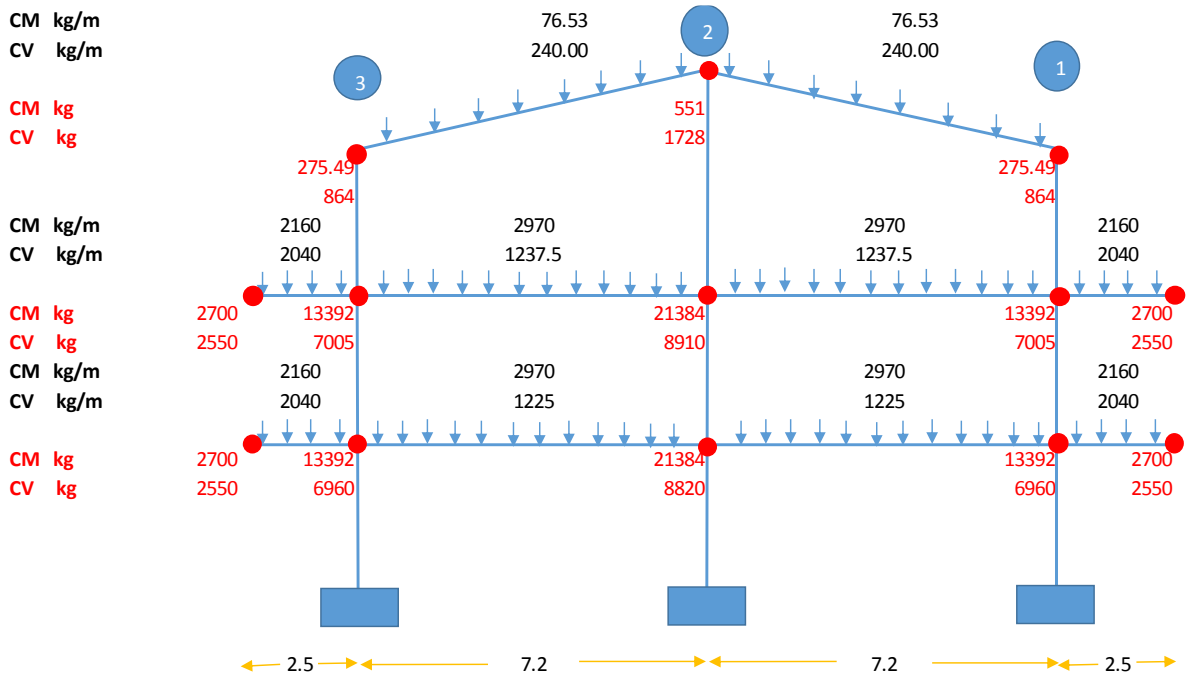
**Eje A-A EDIFICIO 4F**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**



**Eje B-B EDIFICIO 4F**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**



**Eje C-C EDIFICIO 4F**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**



**Eje D-D EDIFICIO 4F**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

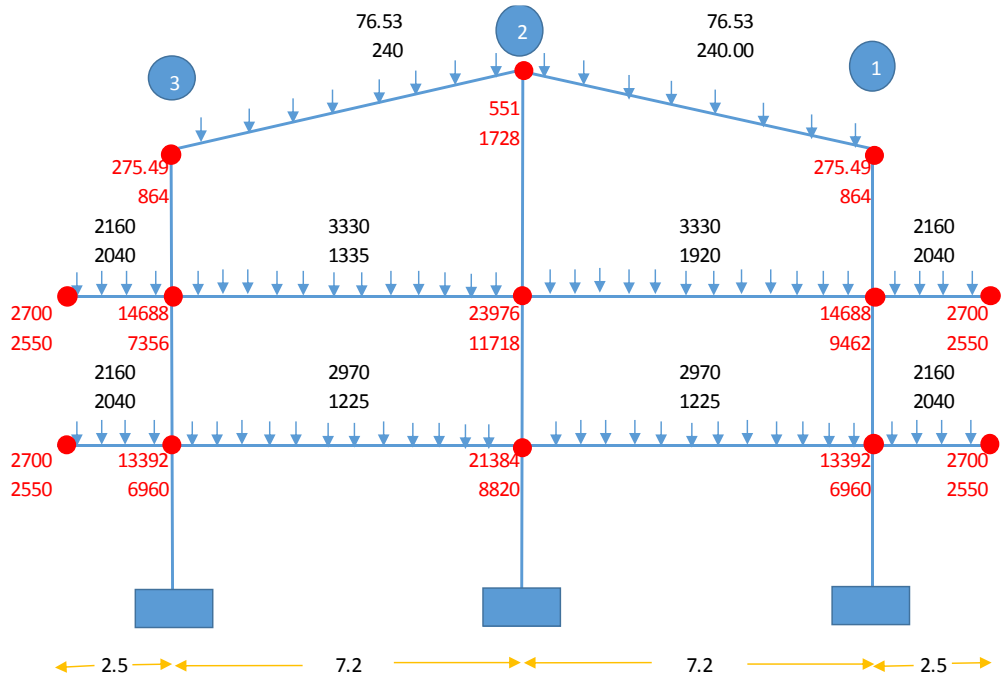
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg



**Eje E-E EDIFICIO 4F**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

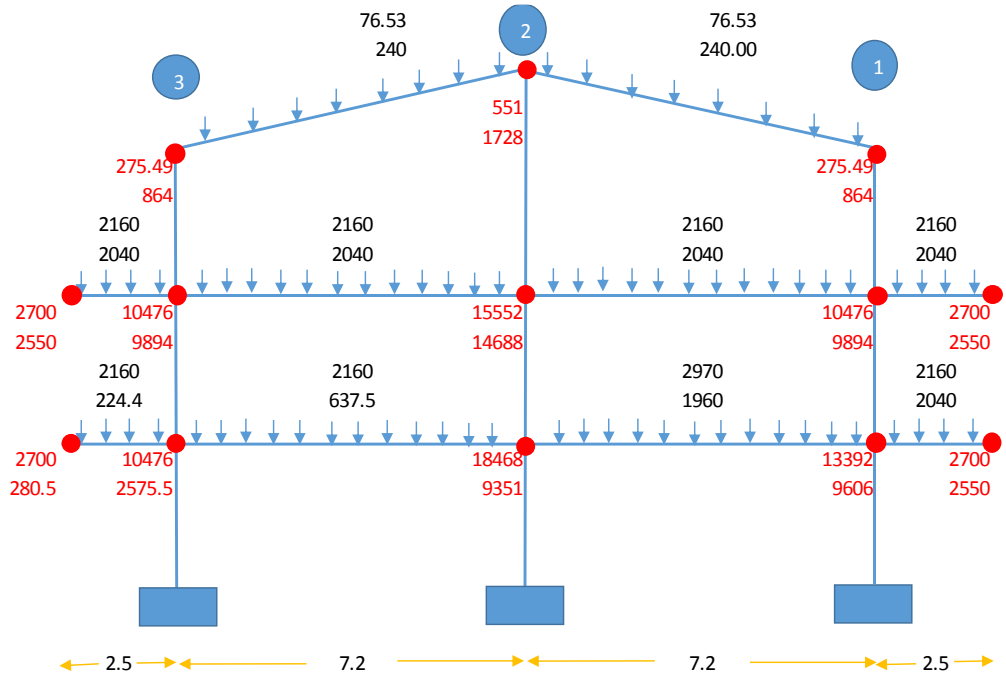
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg



**Eje F-F EDIFICIO 4F**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

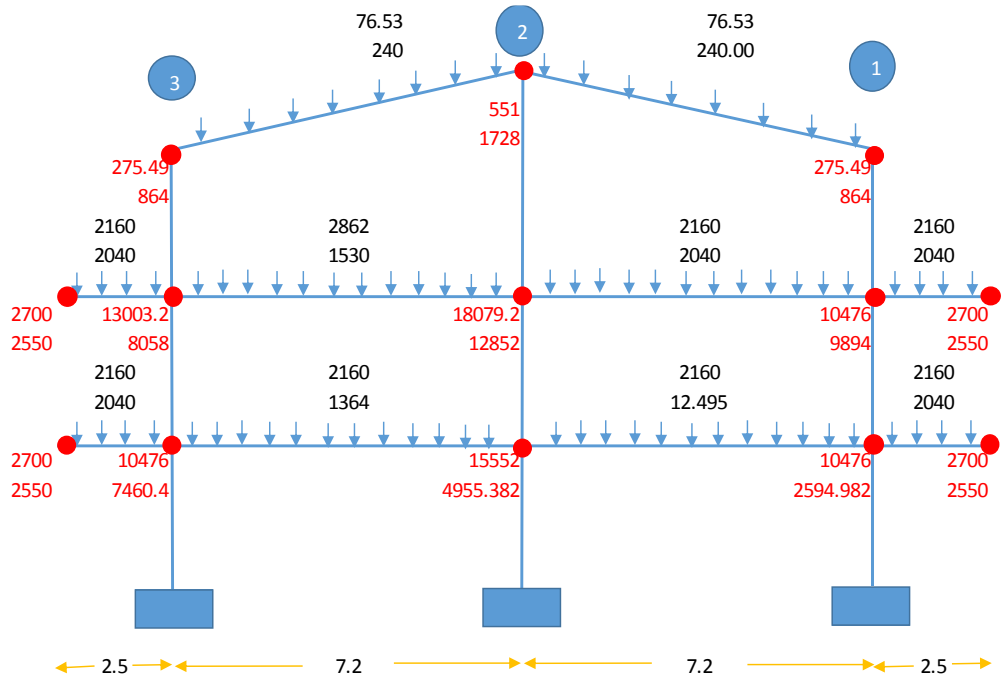
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg



**Eje G-G EDIFICIO 4F**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

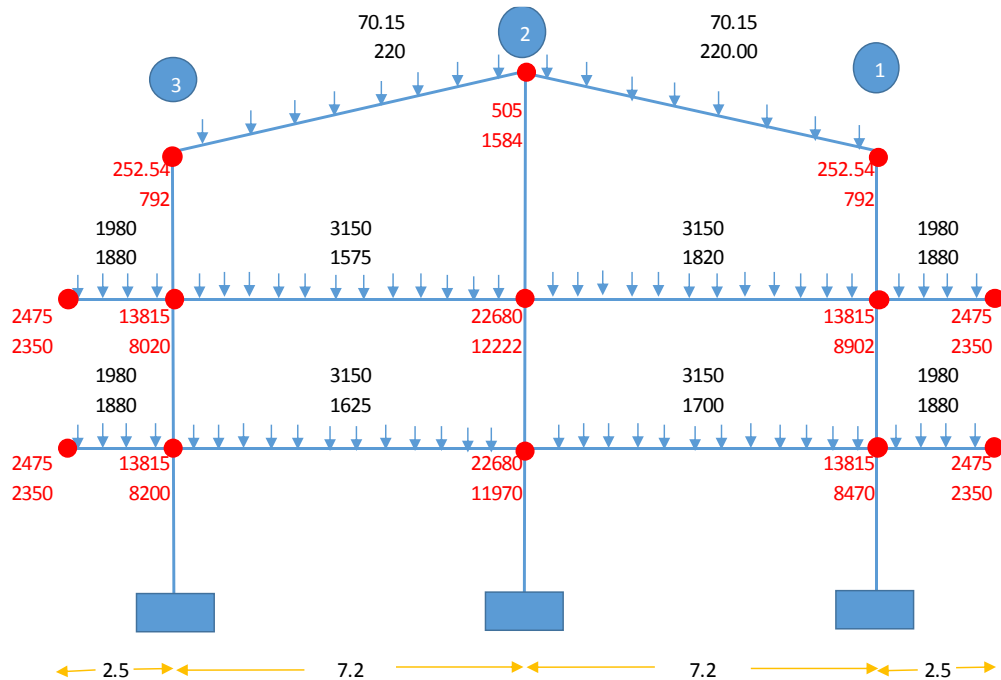
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg



**Eje H-H EDIFICIO 4F**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**



CM kg/m  
CV kg/m

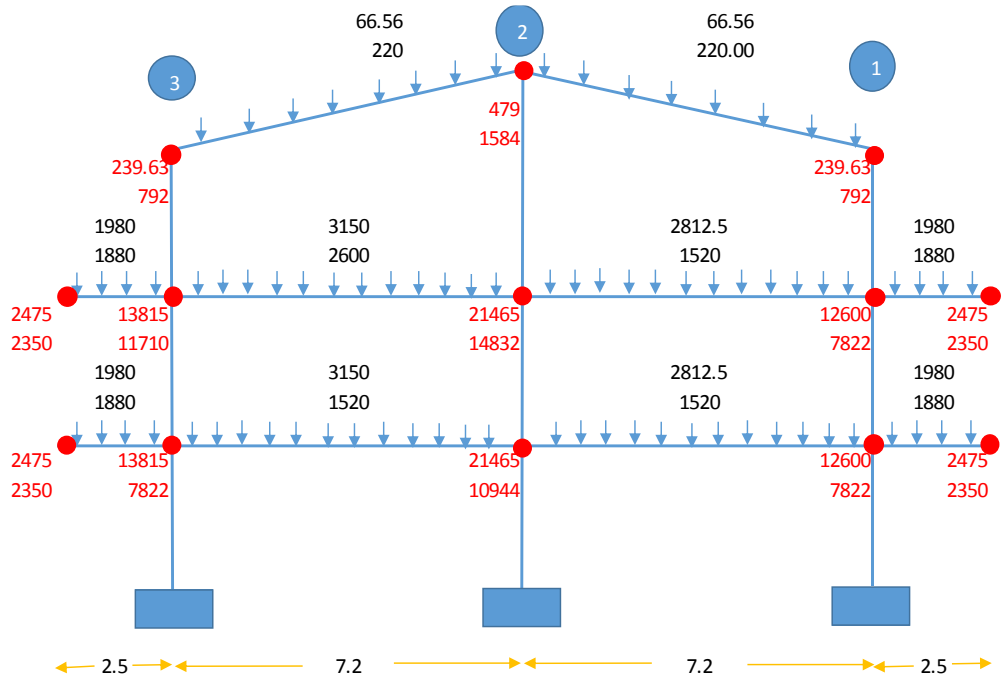
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg



**Eje A-A EDIFICIO 2H**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

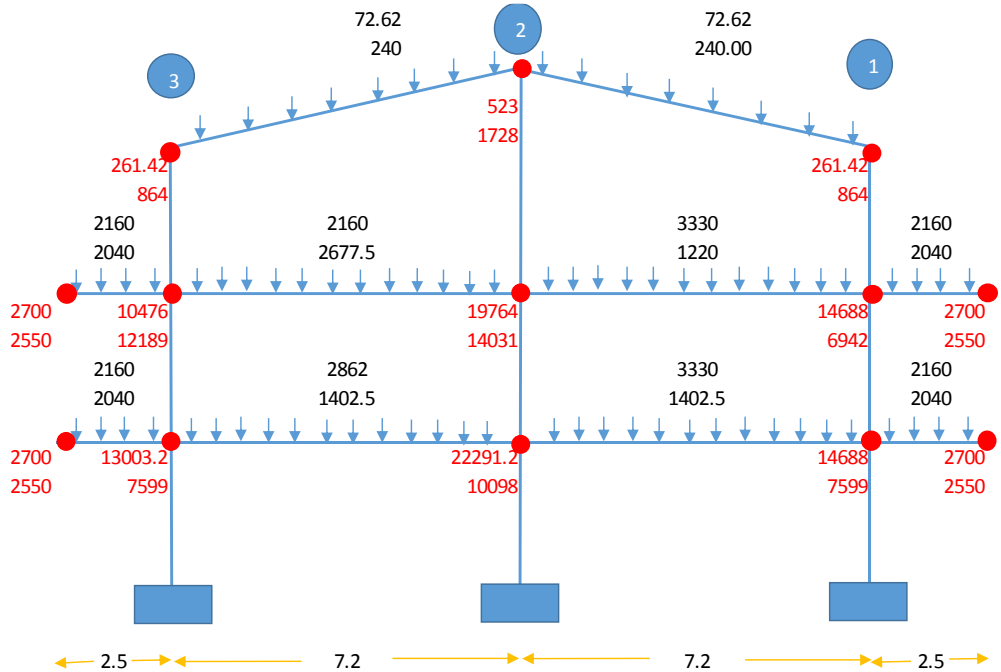
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

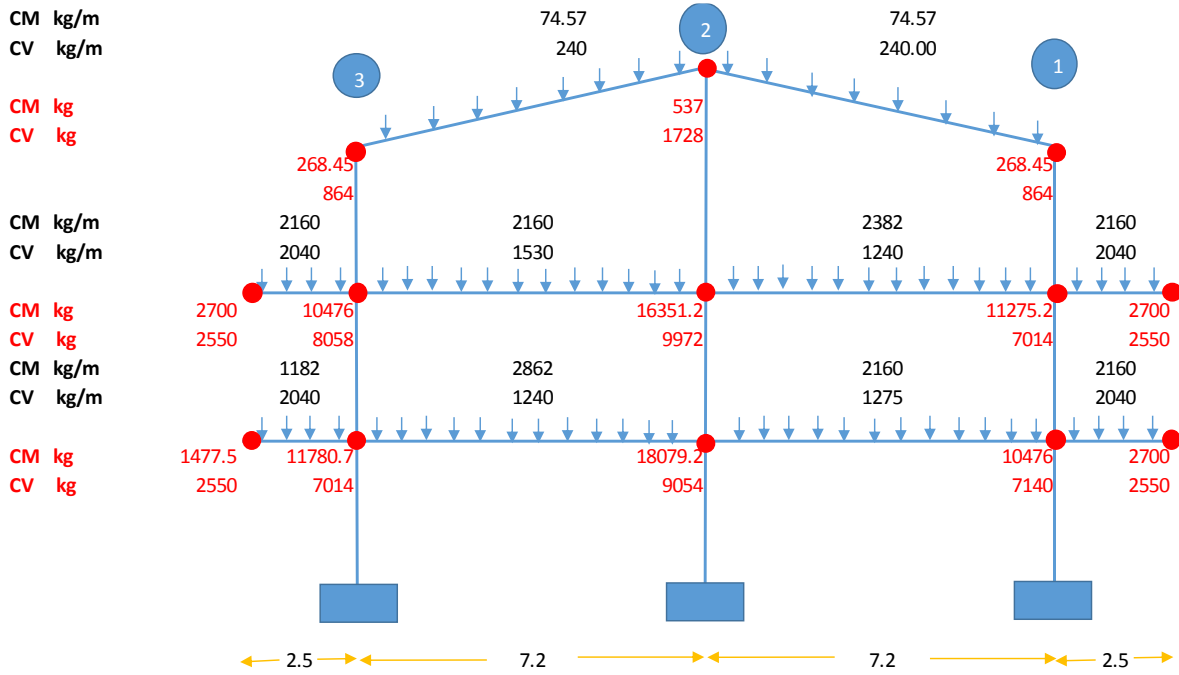
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

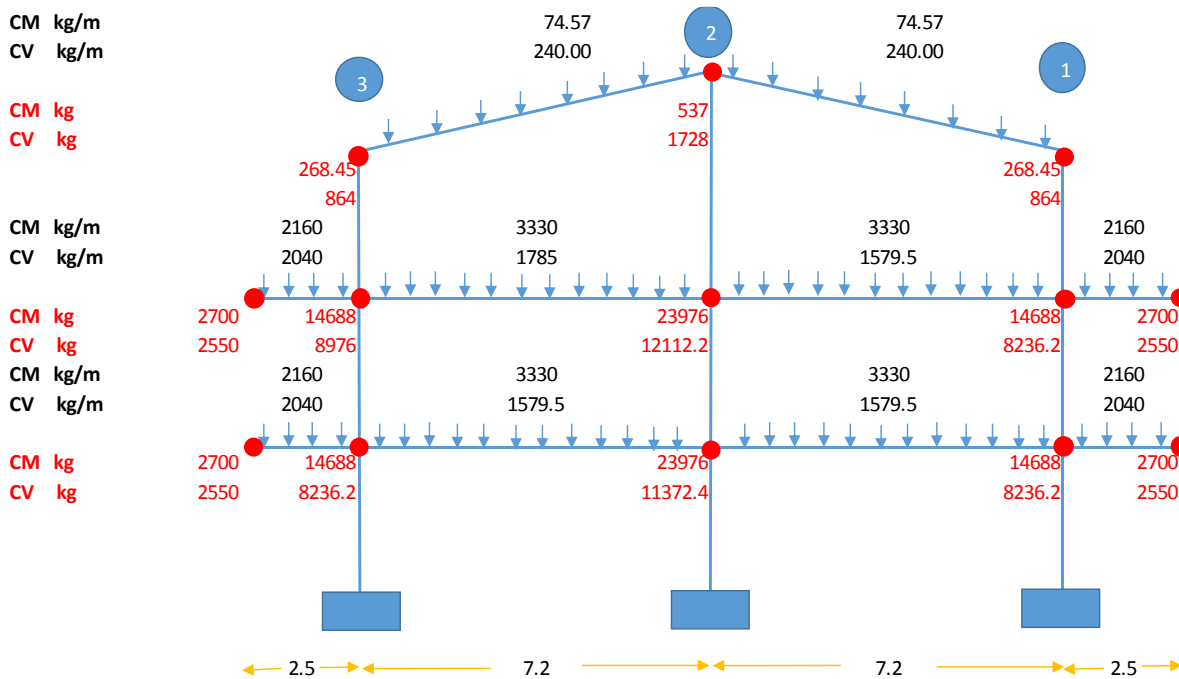
CM kg  
CV kg



**Eje B-B EDIFICIO 2H**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**



**Eje C-C EDIFICIO 2H**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**



**Eje D-D EDIFICIO 2H**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

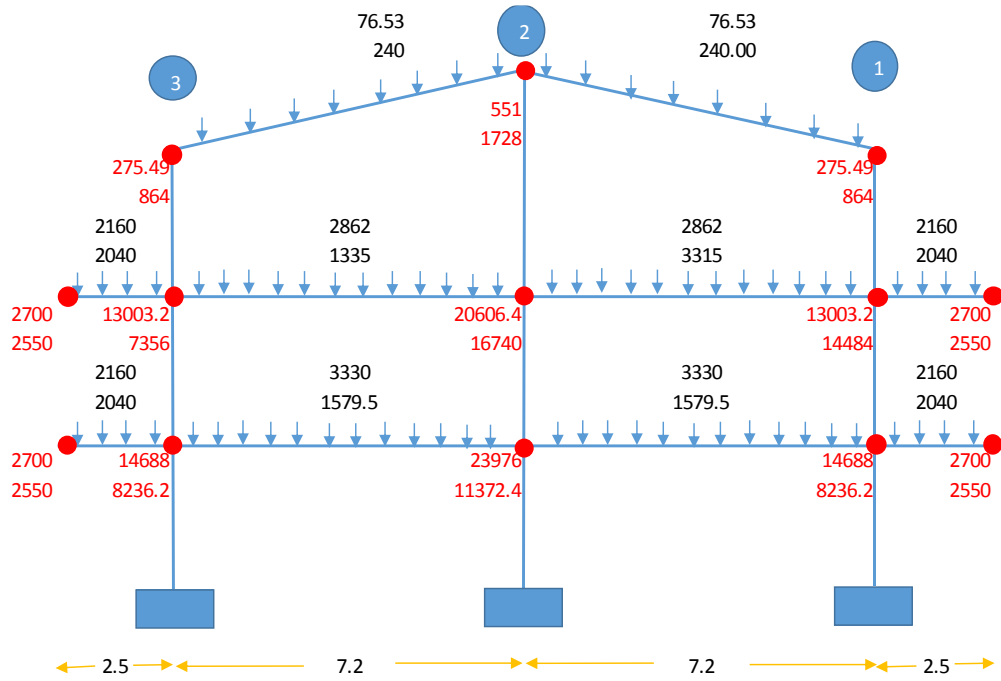
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg



**Eje E-E EDIFICIO 2H**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

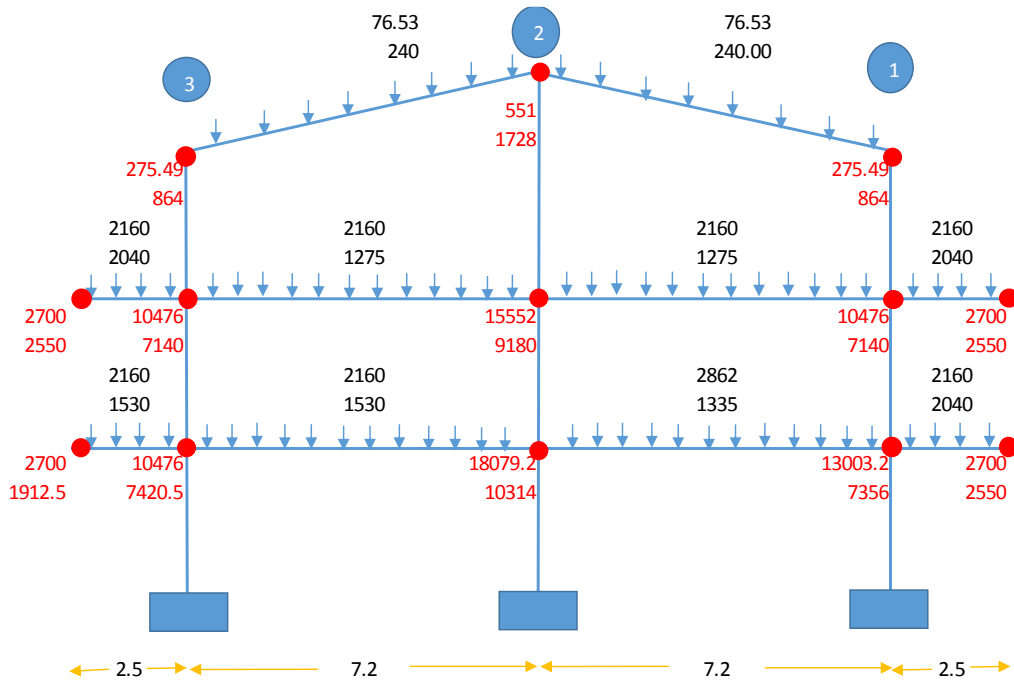
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg



**Eje F-F EDIFICIO 2H**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

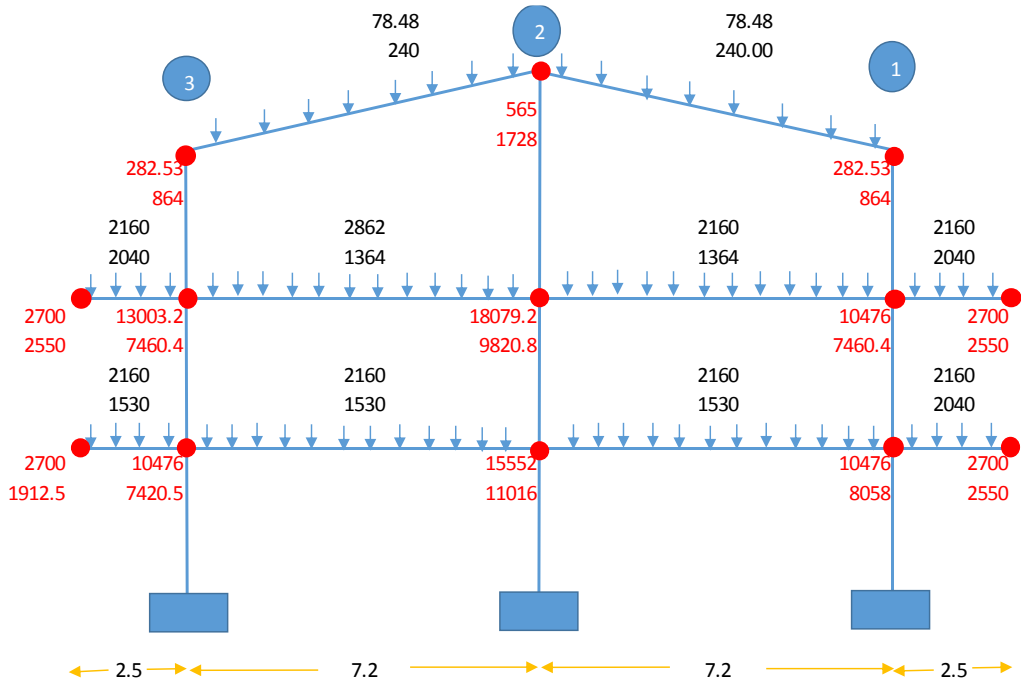
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg



**Eje G-G EDIFICIO 2H**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

CM kg/m  
CV kg/m

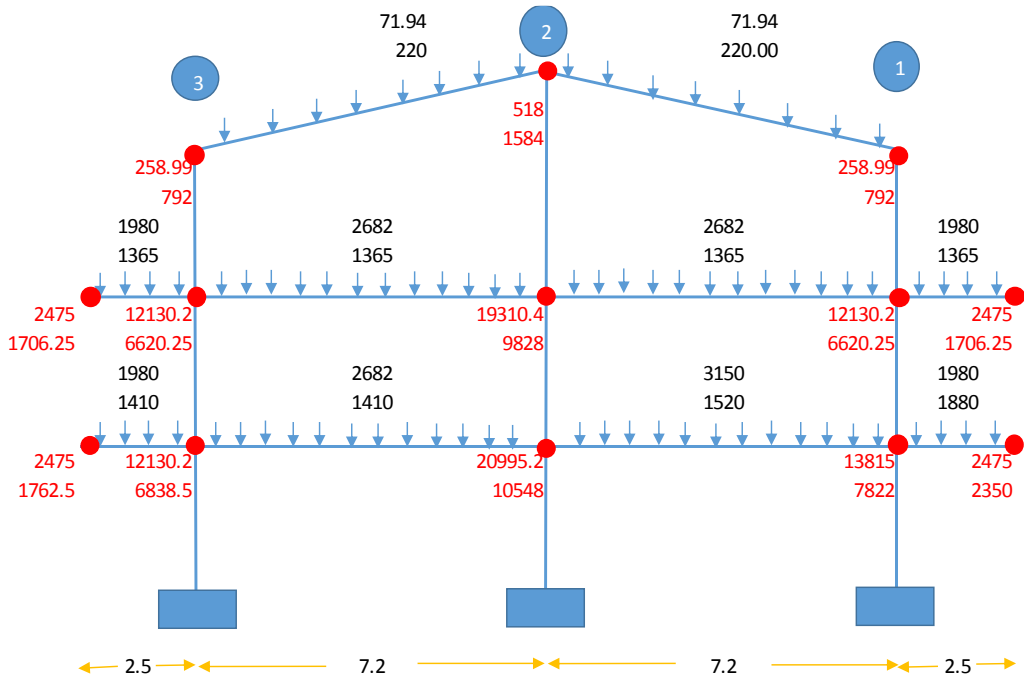
CM kg  
CV kg

CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

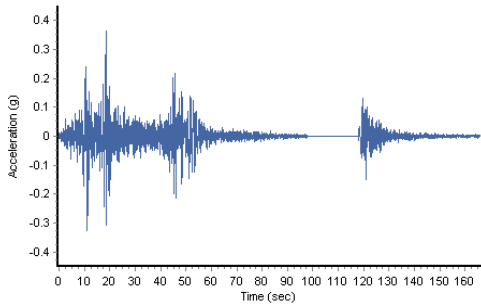
CM kg/m  
CV kg/m

CM kg  
CV kg

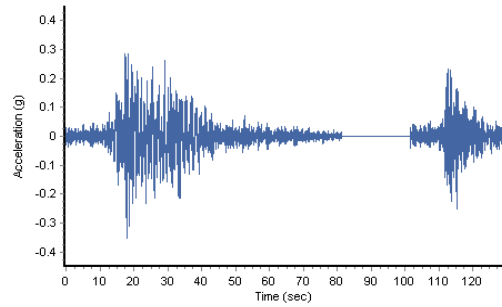


**Eje H-H EDIFICIO 2H**  
**Metrado de cargas y masas en nudos**

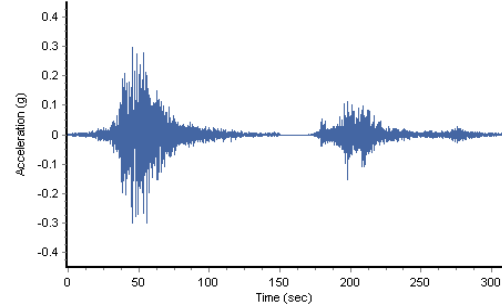
## ANEXO 02: SECUENCIAS SÍSMICAS



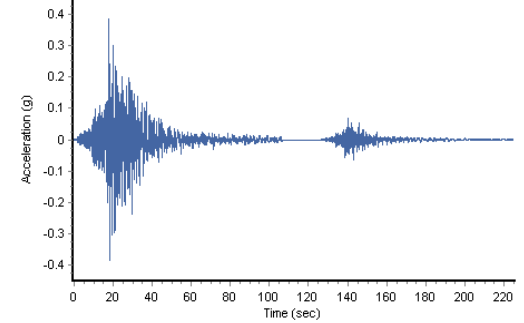
(a)



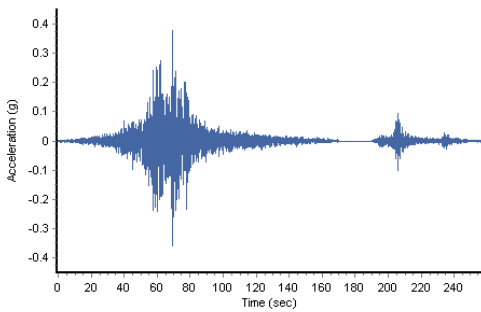
(b)



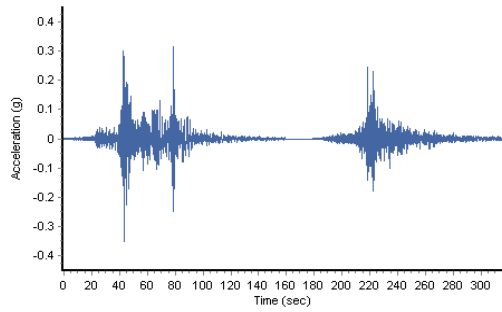
(c)



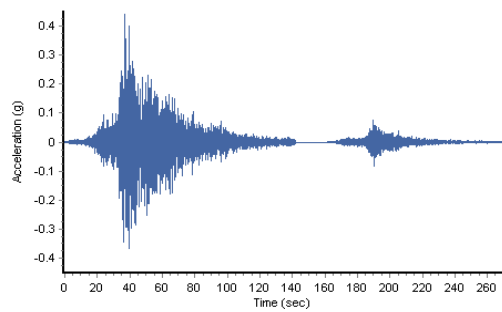
(d)



(e)

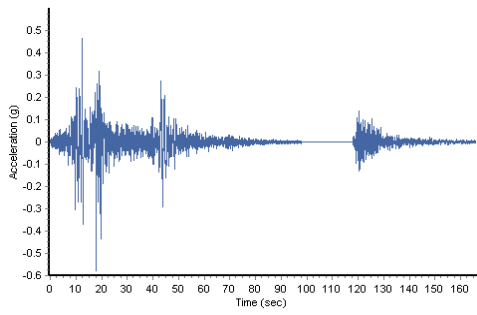


(f)

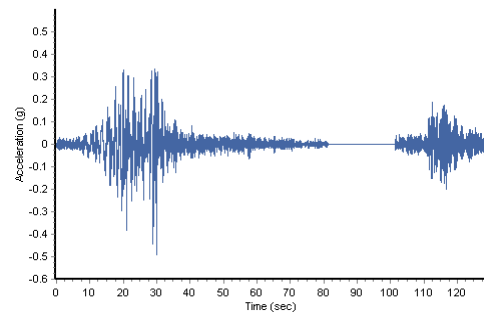


(g)

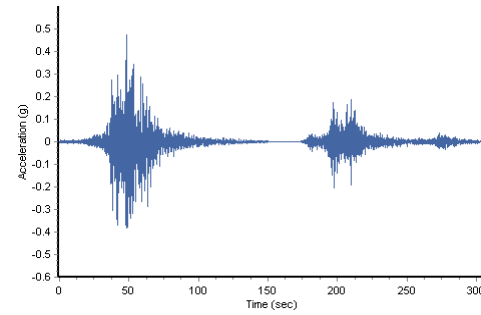
**Figura N°A-1** : Secuencias de sismos y réplicas Componente EW (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo ocasional) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocoilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015



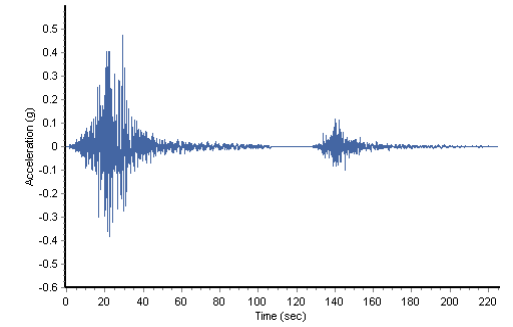
(a)



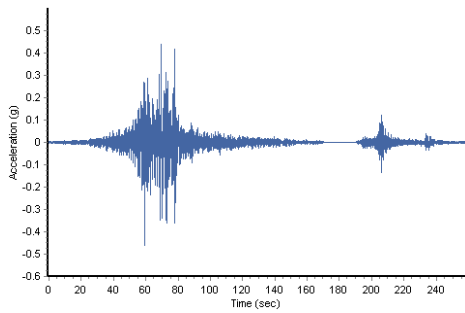
(b)



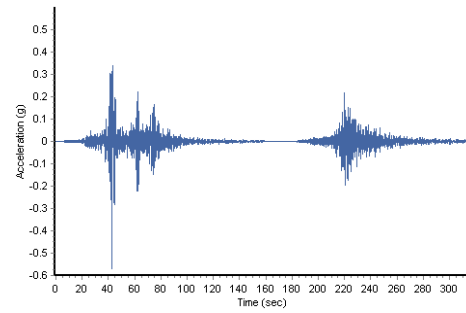
(c)



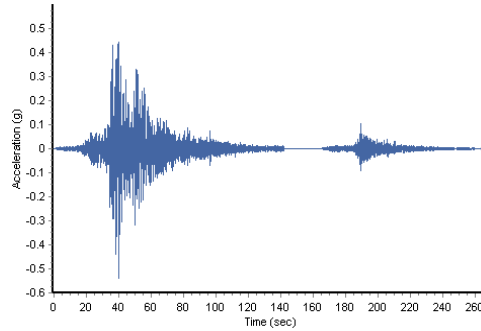
(d)



(e)

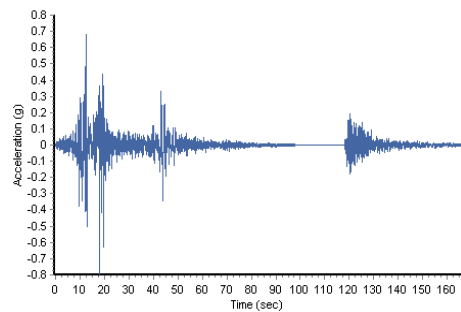


(f)

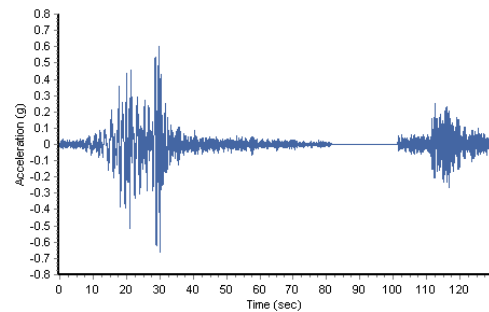


(g)

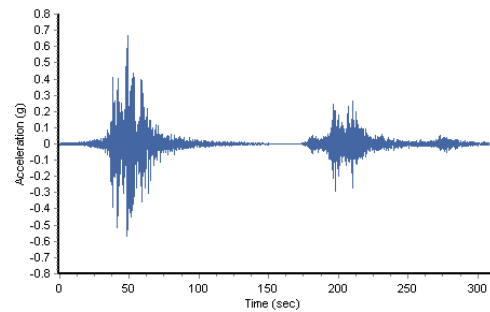
**Figura N°A-2** : Secuencias de sismos y réplicas Componente EW (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo raro) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015



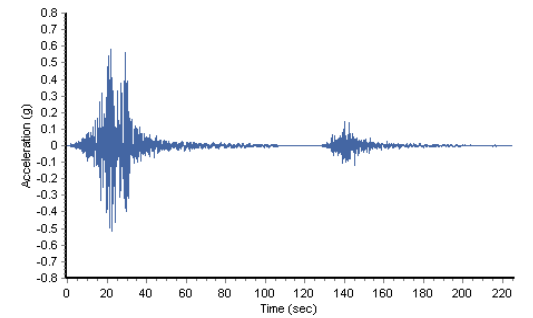
(a)



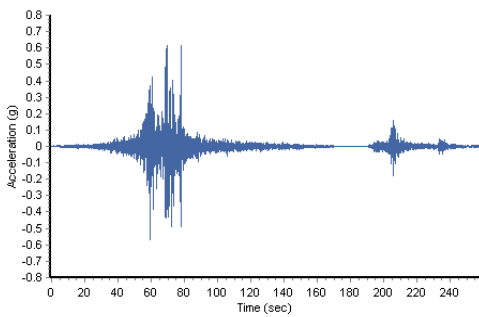
(b)



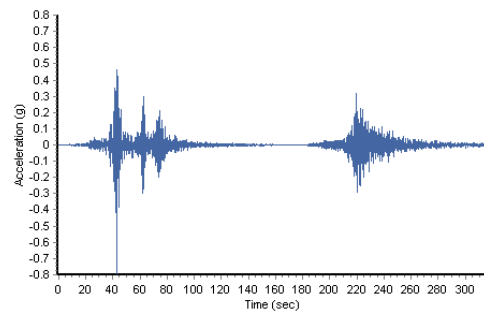
(c)



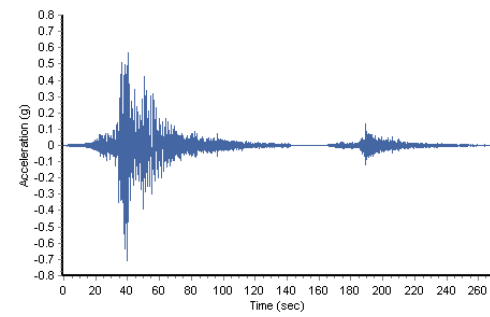
(d)



(e)

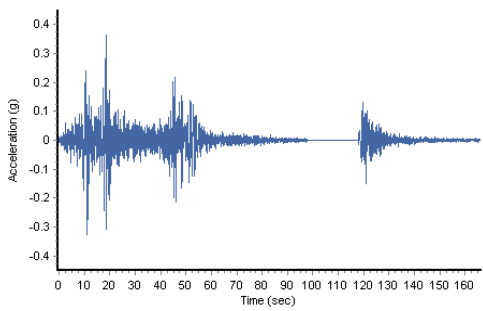


(f)

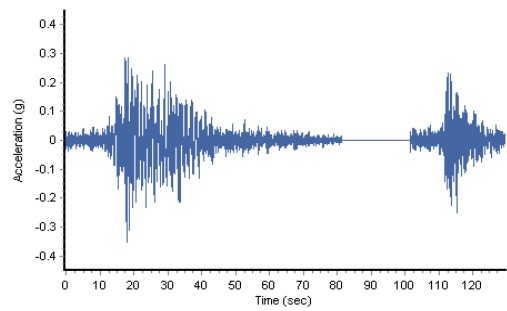


(g)

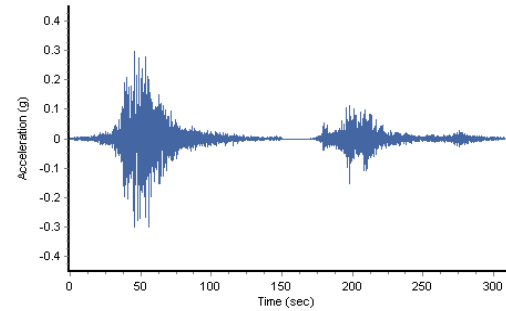
**Figura N°A-3** : Secuencias de sismos y réplicas Componente NS (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo muy raro) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015



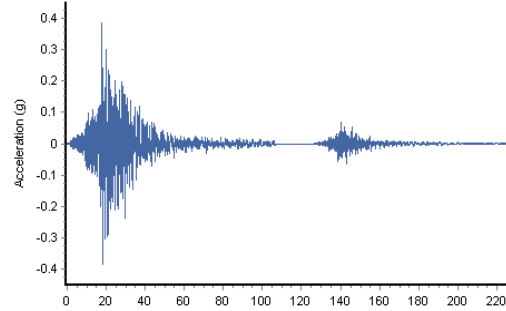
(a)



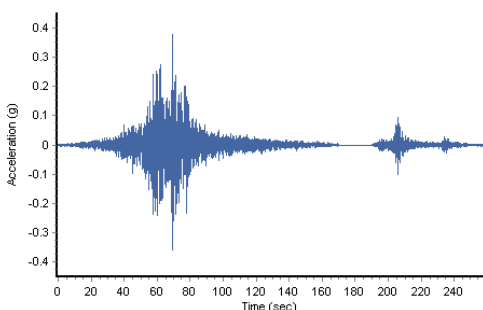
(b)



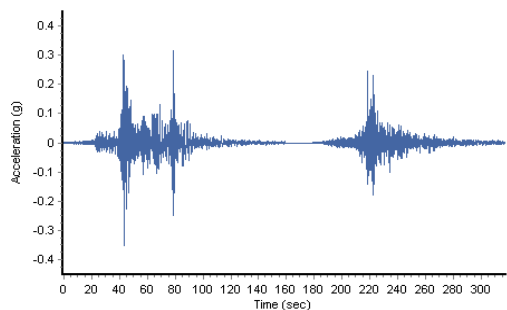
(c)



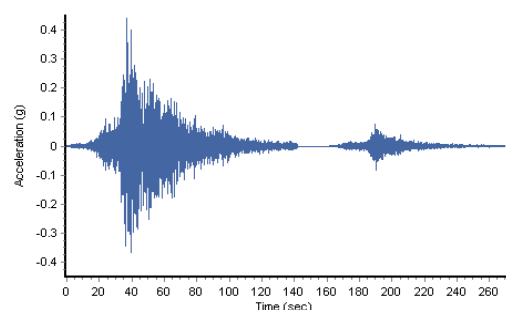
(d)



(e)



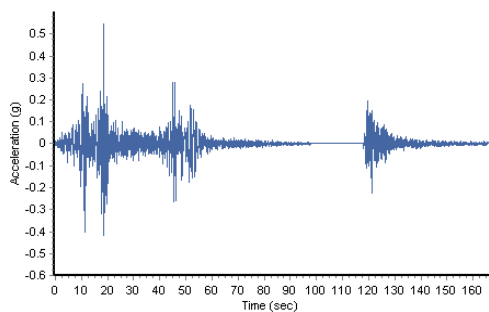
(f)



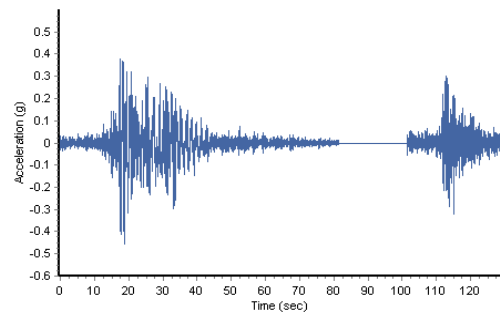
(g)

**Figura N°A-4** : Secuencias de sismos y réplicas Componente NS (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo ocasional) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015

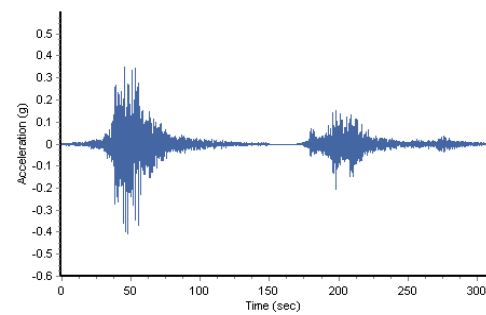




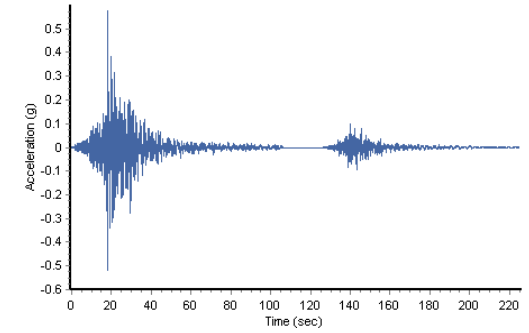
(a)



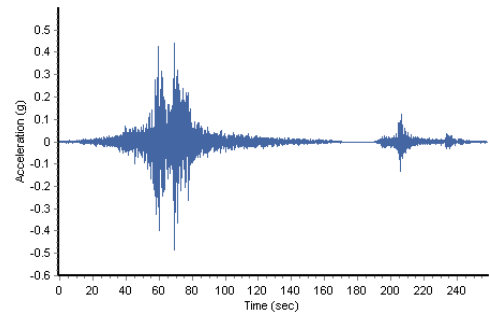
(b)



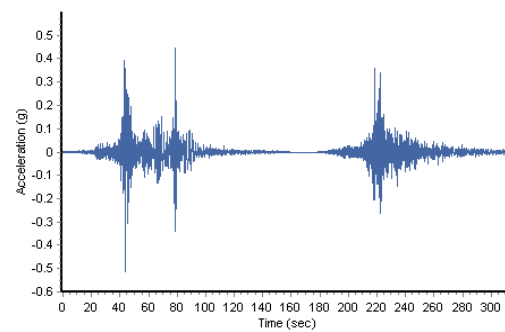
(c)



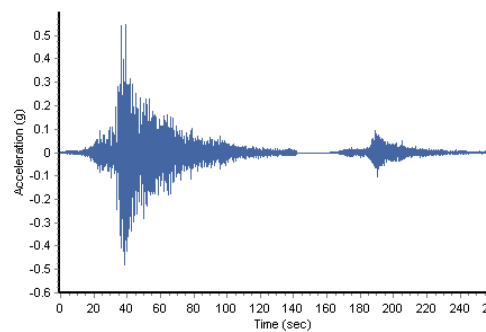
(d)



(e)

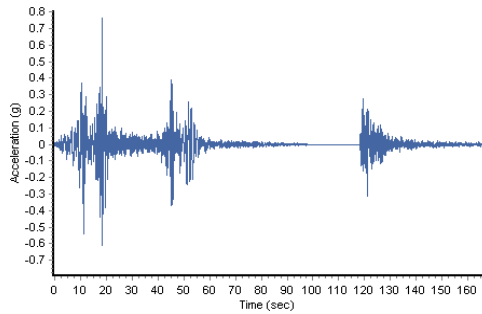


(f)

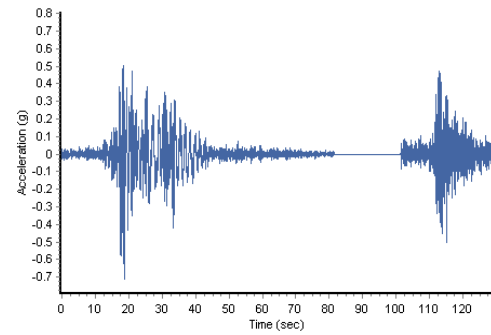


(g)

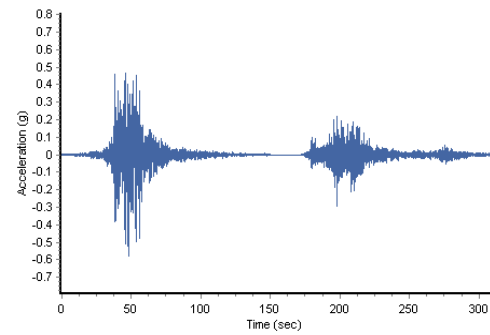
**Figura N°A-5** : Secuencias de sismos y réplicas Componente NS (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo raro) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015



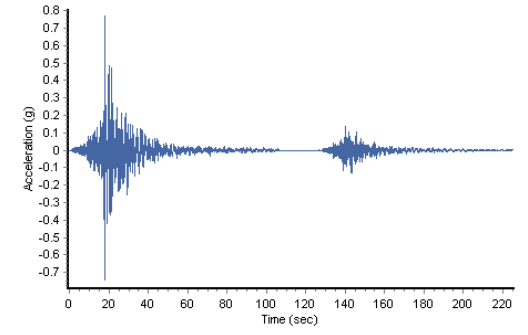
(a)



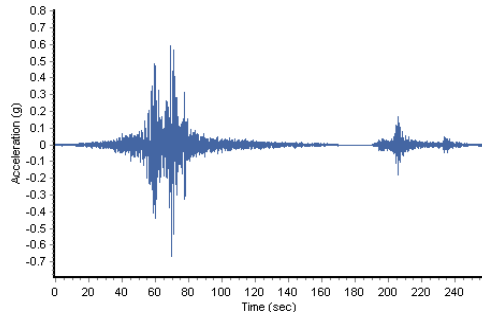
(b)



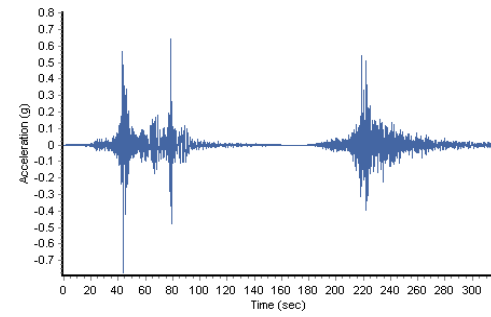
(c)



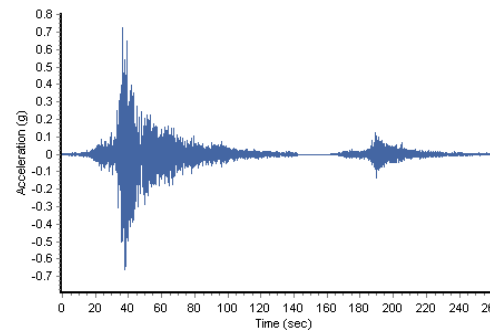
(d)



(e)



(f)



(g)

**Figura N°A-6** : Secuencias de sismos y réplicas Componente NS (escalados a un nivel de peligro sísmico de sismo muy raro) con un silencio de aceleración de 20 segundos: (a) Lima 1974, (b) Valparaiso 1985, (c) Arequipa 2001, (d) Tocopilla 2007, (e) Maule 2010, (f) Iquique 2014 y (g) Coquimbo 2015

### **ANEXO 03: PLANOS**

- 2H E01: Cimentaciones Edificio 2H
- 2H E02: Vigas Principales Edificio 2H
- 2H E03: Vigas Secundarias Edificio 2H
- 4F E01: Cimentaciones Edificio 4F
- 4F E02: Vigas Principales Edificio 4F
- 4F E03: Vigas Secundarias Edificio 4F