

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ESTIMACIÓN DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE VIVIENDA
SOCIAL DE 2 PISOS DE MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA EN LA
COSTA CENTRAL DEL PERÚ**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Cesar Abraham Reyes Virhuez

ASESOR:

Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo

Lima, Julio, 2022

Resumen

La costa central del Perú se encuentra en silencio sísmico desde hace muchos años por lo que es de gran importancia estudiar el comportamiento que sufrirán las estructuras peruanas ante eventos sísmicos de diversas intensidades y estimar sus consecuencias económicas y sociales con la finalidad de planificar acciones de prevención y reconstrucción. En el caso de las edificaciones de muros de ductilidad limitada no se cuenta con la experiencia de campo sobre su comportamiento estructural respecto a eventos sísmicos debido a que son construcciones relativamente nuevas y no son tradicionales.

Las investigaciones respecto al desempeño sísmico de estructuras con muros de ductilidad limitada en nuestro país principalmente se centran en el estudio de las edificaciones de departamentos mayores a 5 pisos y no a viviendas unifamiliares de 2 o 3 pisos. En los estudios previos se han obtenido curvas de fragilidad, que analizan el comportamiento sísmico y los daños sufridos en las estructuras, y curvas de vulnerabilidad, que estiman los costos de los daños generados y sus costos de reparación, para edificaciones mayores a 5 pisos: mientras que solo curvas de fragilidad para viviendas de 2 o 3 pisos. Esta tesis tiene como finalidad ampliar el espectro de análisis del estudio del desempeño sísmico de esta tipología a través del estudio de la vulnerabilidad sísmica de viviendas sociales de 2 niveles.

Dedicatoria

A Justina por ser mi mejor guía

A Abraham, Manuel y Florencia, siempre estarán en mi mente y mi corazón

A Silvia, Juliana y toda mi familia, por el cariño

A la vida, pues después de algunos años de búsqueda tengo la sensación que he encontrado
mi vocación

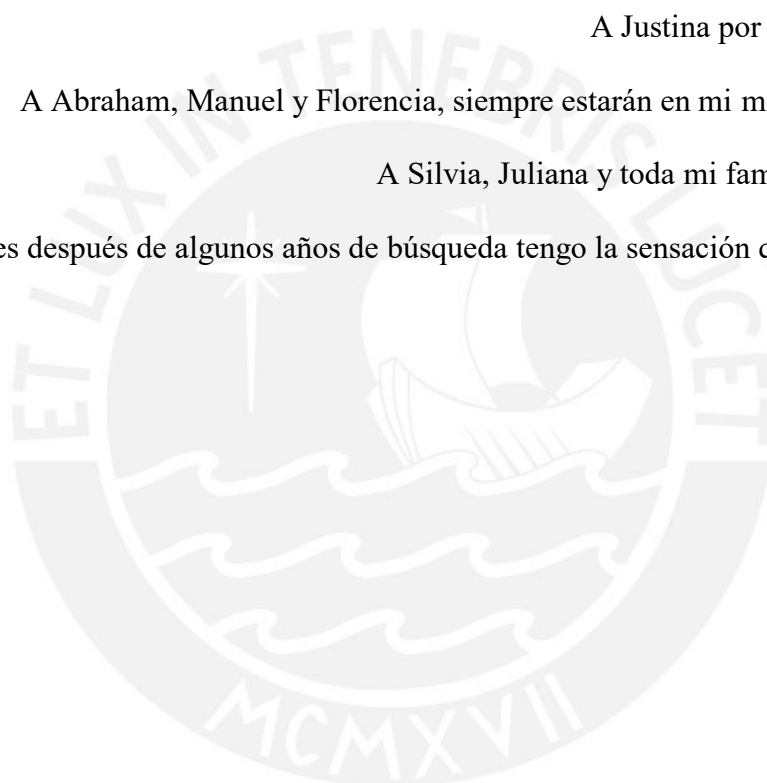
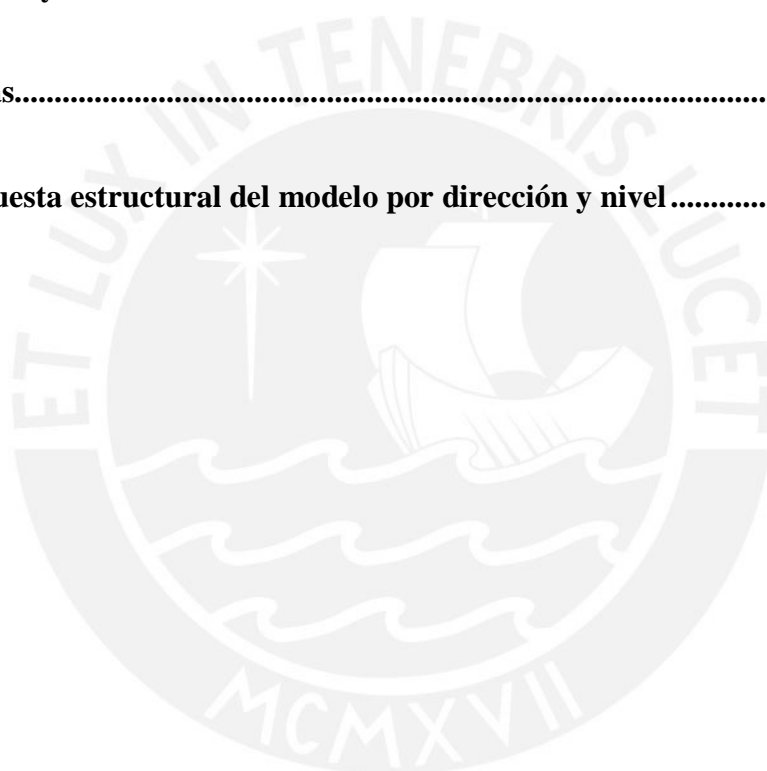


Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance.....	2
1.4. Hipótesis	3
2. Marco Teórico	4
2.1. Edificaciones de Muros de Ductilidad Limitada.	4
2.2. Análisis Dinámico Incremental	6
2.3. Análisis de desempeño sísmico de edificaciones	8
2.4. Antecedentes	10
3. Metodología y Aplicación de la Investigación	18
3.1. Metodología de la Investigación	18
3.2. Aplicación de la metodología.....	18
3.2.1. Tipología propuesta.....	18
3.2.2. Curva de fragilidad.....	20
3.2.2.1 <i>Demandas sísmicas.....</i>	<i>20</i>
3.2.2.2 <i>Modelo numérico de la tipología.....</i>	<i>21</i>
3.2.2.3 <i>Relaciones constitutivas de los materiales.....</i>	<i>22</i>
3.2.2.4 <i>Modelo no lineal de los muros.....</i>	<i>25</i>
3.2.2.5 <i>Amortiguamiento estructural.....</i>	<i>27</i>
3.2.2.6 <i>Degradación cíclica.....</i>	<i>28</i>
3.2.3. Curva de fragilidad de la tipología.....	29
3.2.3.1 <i>Análisis dinámico incremental.....</i>	<i>29</i>
3.2.3.2 <i>Curva de fragilidad.....</i>	<i>32</i>

3.2.3.3	<i>Curvas de fragilidad de Muros de Ductilidad Limitada (MDL).</i>	33
3.2.3.4	<i>Funciones de consecuencias de Muros de Ductilidad Limitada (MDL).</i>	37
3.2.4.	Curva de Vulnerabilidad.	40
3.2.3.5	<i>Intensidades sísmicas características en la región.</i>	40
3.2.3.6	<i>Simulación del desempeño de la estructura EMDL.</i>	41
4.	Análisis y comparación de resultados	45
5.	Conclusiones y Recomendaciones	48
5.	Referencias	49
ANEXO:	Respuesta estructural del modelo por dirección y nivel	53



Lista de Figuras

Figura 1. Comportamiento a tracción de barras de acero corrugado grado 60 de $f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$ (línea azul) y de malla electrosoldada de $f_y=6500 \text{ kg/cm}^2$ (línea roja).	4
Figura 2. Edificio de ductilidad limitada típico de 5 pisos.	6
Figura 3. Ejemplo de curvas IDAs.	7
Figura 4. Flujograma del proceso de diseño basado en desempeño.	8
Figura 5. Curvas de Fragilidad para edificios de EMDL de 5 pisos.	11
Figura 6. Curvas de Fragilidad para edificios de EMDL de 7 pisos.	11
Figura 7. Estimación de daños para edificios de 5 y 7 pisos de EMDL para diferentes intensidades sísmicas.	12
Figura 8. Curva de fragilidad de colapso de un edificio de muros de ductilidad limitada de 5 pisos.	13
Figura 9. Curvas de fragilidad de EMDL de 5 pisos.	14
Figura 10. Estado de daños de muros para diversos sismos.	15
Figura 11. Curva de vulnerabilidad de reparación.	16
Figura 12. Curvas de fragilidad para la vivienda unifamiliar de muros de ductilidad limitada de 3 pisos.	16
Figura 13. Curvas de fragilidad para la vivienda unifamiliar de muros de ductilidad limitada de 2 pisos.	17
Figura 14. Planta típica representativa de vivienda de muros de ductilidad limitada de dos niveles.	19
Figura 15. Media geométrica de los espectros de los registros horizontales del sismo Lima 1966.	21
Figura 16. Comparación de los espectros de pseudoaceleración de los 11 sismos seleccionados.	21

Figura 17. Modelo del prototipo conformado por muros en el programa Perform 3D.	22
Figura 18. Relación esfuerzo deformación del acero de tracción y compresión.	23
Figura 19. Relación esfuerzo- deformación del concreto.	24
Figura 20. Relación esfuerzo-deformación por corte.	25
Figura 21. Modelamiento de muros a través de fibras.	25
Figura 22. Modelo de fibras (a) verticales, (b) horizontales y (c) modelo de corte.	26
Figura 23. (a) rótula plástica en el primer nivel y (b) rótula plástica en la zona inferior del primer nivel.	26
Figura 24. (a) 1 sección (b) 2 secciones.	27
Figura 25. Amortiguamiento de Rayleigh.	28
Figura 26. Degradación cíclica para: (a) un muro sin carga de gravedad, (b) muro sometido a 300 KN de carga de gravedad.	29
Figura 27. Ejemplo de escalamiento para el registro sísmico de Lima de 1966.	30
Figura 28. Ejemplo de registro sísmico escalado.	30
Figura 29. Respuesta de la deriva global del eje x para el sismo Lima 1966 escalado.	31
Figura 30. Curvas de análisis dinámico incremental del prototipo.	31
Figura 31: Curvas de fragilidad de colapso de la tipología.	32
Figura 32. Muro en estado de daño límite 1.	33
Figura 33. Muro en estado de daño límite 2.	34
Figura 34. Muro en estado de daño límite 3.	35
Figura 35. Comparativo de curvas de fragilidad de MDL rectangulares.	35
Figura 36. Curvas de fragilidad de muros con ensanche en los bordes.	36
Figura 37. Curvas de fragilidad de muros con muros transversales en los bordes.	36
Figura 38. Reparación mediante inyección epóxica.	37
Figura 39. Reforzamiento mediante malla electrosoldada.	38

Figura 40. Reposición del muro.....	39
Figura 41. Funciones de consecuencias de costos estructurales de reparación.	39
Figura 42: Espectro de los sismos de diseño para el Perú.	41
Figura 43. Curva de fragilidad de colapso de la tipología.	42
Figura 44. Curva de fragilidad de estados de daño del muro rectangular.....	43
Figura 45. Costos de reparación del muro rectangular.	43
Figura 46. Probabilidad de excedencia de costos de reparación/reconstrucción.	44
Figura 47. Comparación de la curva de fragilidad de colapso con estudios previos.	45
Figura 48. Estado de daños de muros para tipología de 2 pisos.	45
Figura 49. Estado de daños de muros para tipología de 5 pisos.	46
Figura 50. Comparación de curva de vulnerabilidad con estudios previos.	46

Lista de Tablas

Tabla 1. Comparación de estados de daños para diferentes investigaciones.....	9
Tabla 2.	14
Tabla 3. Valores de Curva de fragilidad para diversos estados de daños en EMDL.	15
Tabla 4. Registros sísmicos seleccionados	20
Tabla 5. Valores de Curva de fragilidad para estado de daño de colapso.	32
Tabla 6. Probabilidad de colapso de la tipología.	41
Tabla 7. Respuesta estructural de deriva de entrepiso para sismos frecuentes ($S_a=0.53g$).	53
Tabla 8. Respuesta estructural de deriva de entrepiso para sismos ocasionales ($S_a=0.66g$)...53	
Tabla 9. Respuesta estructural de deriva de entrepiso para sismos raros ($S_a=1.05g$).	54
Tabla 10. Respuesta estructural de deriva de entrepiso para sismos muy raros ($S_a=1.31g$). .54	

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1.....	7
Ecuación 2.....	28
Ecuación 3.....	28
Ecuación 4.....	28
Ecuación 5.....	29



1. Introducción

1.1. Planteamiento del problema

La costa central de nuestro país, y en especial la ciudad de Lima se encuentra en silencio sísmico desde hace muchos años por lo que son muy pocas las personas que hayan experimentado un evento sísmico de mediano o gran intensidad. Por otro lado, las edificaciones de muros de ductilidad limitada son estructuras relativamente nuevas por lo que no se tiene registros en campo de su comportamiento en ante eventos sísmicos. Son varias las investigaciones que se han realizado con el objetivo de estudiar el comportamiento sísmico no lineal y la estimación de pérdidas para esta tipología. Sin embargo, la mayoría se centran en edificios mayores a 5 pisos como los estudios realizados por Delgado y Peña (2006); Gálvez (2008); Gonzales (2010); Reyes (2017) y solo López y Rodríguez (2018) estudiaron el desempeño sísmico de viviendas de 2 y 3 pisos a través de la generación de curvas de fragilidad. No obstante, aún no se han obtenido curvas de vulnerabilidad, no se han estimado las pérdidas para edificaciones de muros de ductilidad limitadas menores a 5 pisos.

Se tienen 4 formas de estimar la vulnerabilidad sísmica de una estructura. Cuando ya se tienen registros del comportamiento de la estructura ante sismos se utiliza la metodología empírica. Otra metodología es a través de la estimación de criterios basados en la opinión de expertos. La tercera metodología es analítica pues se pretenden entender el comportamiento sísmico a través de modelos matemáticos. Finalmente, la metodología híbrida consiste en combinar la metodología empírica y la analítica (Crowley, Pinho, Bommer y Bird, 2001). La presente investigación tiene como finalidad estimar la vulnerabilidad sísmica de viviendas de 2 niveles de muros de ductilidad limitada empleando la metodología analítica utilizada por Reyes (2017) quien se basó en la primera edición del reporte FEMA P-58-1 (Federal Emergency Management Agency [FEMA], 2018).

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general.

El objetivo general de la investigación es contribuir a aumentar la seguridad de las viviendas sociales en el Perú a través de la estimación de la vulnerabilidad sísmica de una vivienda social de 2 pisos de muros de ductilidad limitada en la costa central del Perú.

1.2.2. Objetivos específicos.

- Representar la tipología de vivienda social de dos niveles de muros de ductilidad limitada mediante un prototipo típico.
- Determinar la curva de fragilidad sísmica para el estado de daño de colapso del prototipo propuesto
- Estimar los daños localizados en el prototipo propuesto ante eventos sísmicos de diversas intensidades
- Estimar los costos de reparación para el prototipo propuesto ante sismos de diversas intensidades.
- Comparar el desempeño sísmico de la vivienda de 2 pisos con el desempeño de estructuras similares encontradas en estudios previos.

1.3. Alcance

Se realizó el estudio de vulnerabilidad sísmica para la tipología propuesta de viviendas sociales de dos niveles de muros de ductilidad limitada utilizando la metodología analítica propuesta por Reyes (2017) cuya base es la primera edición del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018). Esta metodología consiste en someter la estructura con modelación no lineal a registros sísmicos que se van escalando denominados Análisis Dinámico Incremental (Vamvatsikos y Cornell, 2002). con la finalidad de obtener curvas de fragilidad para distintos estados de daño. Luego, se estiman la vulnerabilidad sísmica mediante los criterios del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) y teniendo como base los resultados experimentales de especímenes realizados

por la Pontificia Universidad Católica del Perú para Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (Laboratorio de Estructuras PUCP, 2016).

1.4. Hipótesis

Las viviendas de dos pisos de muros de ductilidad limitada para la costa central del Perú poseen un apropiado desempeño sísmico.



2. Marco Teórico

2.1. Edificaciones de Muros de Ductilidad Limitada.

Las edificaciones de muros de ductilidad limitada tienen como característica que la resistencia sísmica la proporcionan los muros de concreto armado de 10 a 12 cm de espesor las cuales están reforzadas por una única malla central de acero corrugado de grado 60 o por una malla electrosoldada y sin confinamiento especial en los bordes, tan solo poseen mayor cuantía de acero. En la figura 1 se muestran la comparación del comportamiento a tracción de una barra de acero corrugado que posee menor esfuerzo de fluencia (f_y) pero mayor capacidad de deformación con relación a la malla electrosoldada.

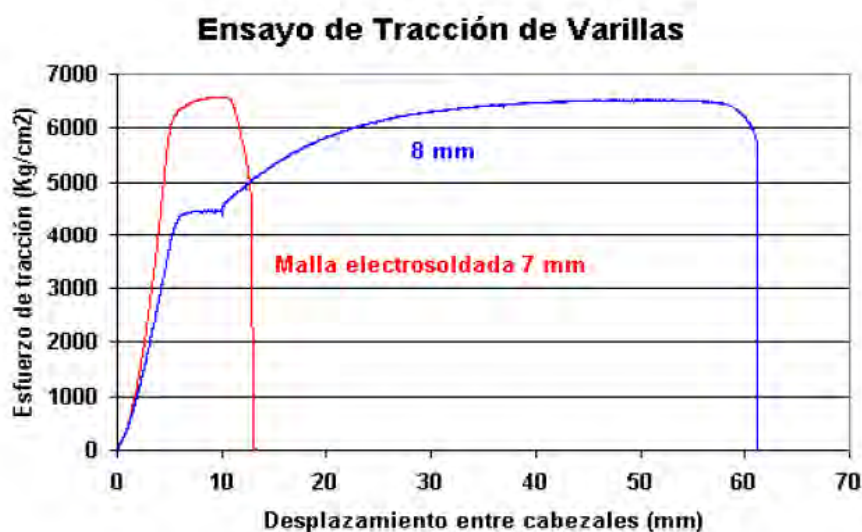


Figura 1. Comportamiento a tracción de barras de acero corrugado grado 60 de $f_y=4200$ kg/cm² (línea azul) y de malla electrosoldada de $f_y=6500$ kg/cm² (línea roja).

Tomado de Laboratorio de Estructuras PUCP. (2004) *Comportamiento sísmico de placas de concreto reforzadas con mallas electrosoldadas*.

Esta tipología se diferencia de los muros tradicionales de concreto armado debido a que los muros habituales tienen un espesor mínimo de 15 cm y están conformadas como mínimo por 2 hileras de mallas de refuerzo, además de poseer un confinamiento especial en los bordes que incluye estribos. Estas características hacen que los muros de ductilidad limitada tengan menor ductilidad en comparación de los muros comunes de concreto armado de acuerdo a la

norma E.060 concreto armado del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS] (2006) y el Laboratorio de Estructuras de la Pontificia Universidad Católica del Perú [Laboratorio de Estructuras PUCP] (2004).

En la figura 2 se muestra una edificación típica con muros de ductilidad limitada. Las características de los muros generan modificaciones en los parámetros de diseño sísmicos fue descrito por Reyes (2017) con base al Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú y son los siguientes:

- La deriva de entrepiso es de 0.005 con relación del 0.007 de estructuras típicas de concreto armado.
- El factor de reducción sísmica es de 6 para estructuras de concreto armado, sin embargo, para este caso especial se reduce a 4.
- Solo se puede utilizar este sistema hasta 7 pisos sin embargo se permite utilizar consideraciones especiales en los primeros pisos si el diseño lo requiere.
- Solo se puede utilizar malla electrosoldada para edificaciones de hasta 3 pisos. Para edificaciones de mayores pisos se debe diseñar el tercio inferior con las condiciones de un edificio convencional y solo se permite el uso de malla electrosoldada en los pisos superiores
- Se permite el uso de losas de transferencias, pero los requisitos son más severos de tal manera que su uso se vuelve poco viable.
- Se garantiza la continuidad vertical solicitando un mínimo de 50% de muros con prolongación a través de las plantas y que la densidad de un nivel debe ser mínimamente el 90% de los pisos colindantes.
- El esfuerzo de compresión del concreto ($f'c$) mínimo es de 175 kg/cm^2 .

En el año 2016, se actualiza la norma de diseño sismo resistente E 0.30 Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismorresistente (MVCS, 2018) la cual mantiene la mayoría de

condiciones para Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en su actualización del año 2018 pero que establece el siguiente cambio:

- Este permite hasta 8 pisos con este tipo de sistema estructural.
- El concreto mínimo es de 210 kg/cm².

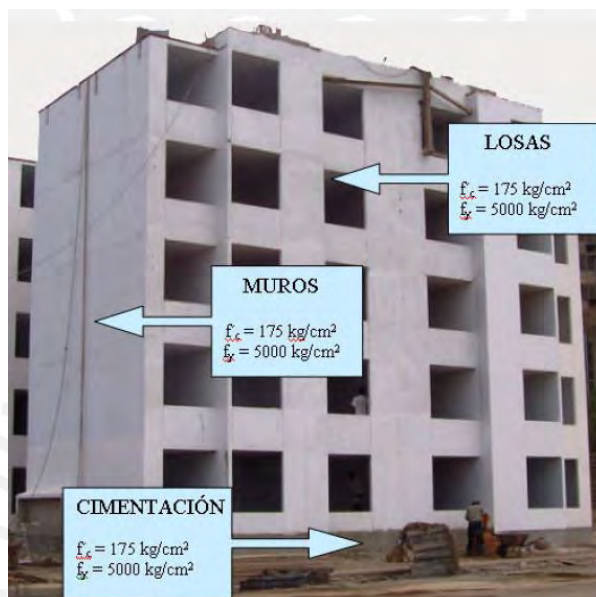


Figura 2. Edificio de ductilidad limitada típico de 5 pisos.

Tomado de Delgado y Peña (2006) *Edificios Peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada*.

2.2. Análisis Dinámico Incremental

El análisis dinámico incremental (IDA por sus siglas en inglés) es una forma de estimar el comportamiento de una estructura no lineal a través de someter la estructura a registros sísmicos que se van escalando e incrementando. Se obtiene una colección de respuestas desde un comportamiento elástico hasta que la estructura colapse (Vamvatsikos y Cornell, 2002). El análisis IDA queda determinada por $F_i(D)$ (ecuación 1) que es la probabilidad de que la respuesta estructural exceda un nivel de estado de daño (i) con relación a un parámetro de demanda sísmica (D). Las curvas se representan a través de una distribución log normal representada por Φ con base de la media de la distribución probabilística θ_i , para un estado de

daño i y la desviación estándar logarítmica, o dispersión, β (FEMA, 2018) expresada por la siguiente relación:

$$F_i(D) = \Phi\left(\frac{\ln\left(\frac{D}{\theta_i}\right)}{\beta_i}\right) \quad \text{Ecuación 1}$$

De este análisis se obtiene respuestas de tiempo-historia del comportamiento de la estructura permitiendo comprender los siguientes puntos (Vamvatsikos y Cornell, 2002).

- La colección de respuestas de la estructura ante un conjunto de potenciales demandas sísmicas.
- Mejorar el entendimiento de los comportamientos estructurales para sismos raros/muy raros.
- Mejorar la comprensión de la respuesta estructural cuando se va incrementando la intensidad sísmica.

En la figura 3, se observa que para intensidades pequeñas la respuesta de la estructura se encuentra en el rango elástico; no obstante, conforme se va incrementando la intensidad sísmica la estructura ingresa y desarrolla su respuesta en el rango inelástico hasta que finalmente colapse.

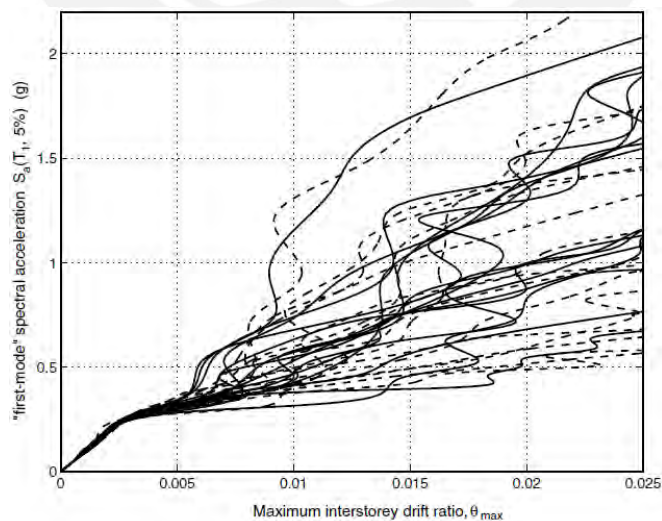


Figura 3. Ejemplo de curvas IDAs.

Tomado de Vamvatsikos y Cornell (2002) *Incremental dynamic analysis*.

2.3. Análisis de desempeño sísmico de edificaciones

En sus inicios, las normas de diseño sismorresistente tenían como objetivo principal resistir los sismos de gran intensidad. Conforme los sismos tienen mayor intensidad poseen un periodo de retorno mayor. Entonces, durante la vida útil una edificación está sometida con mayor frecuencia a sismos de menor intensidad que no generar colapso de la estructura pero sí daños leves y no estructurales. Es por ello que las normas han evolucionado y se enfocan a resistir sismos de mayor intensidad y minimizar los daños para sismos de menor intensidad.

El análisis por desempeño establece los niveles de daños que son aceptables para cada tipo de intensidad sísmica. Los niveles de daños serán definidos dependiendo de la importancia de la estructura, costos de reparación, ubicación, entre otros. La figura 4 muestra el flujograma que se realiza para un diseño por desempeño en la que se realizan las iteraciones necesarias hasta que la estructura cumpla con los daños definidos para cada intensidad (FEMA, 2018).

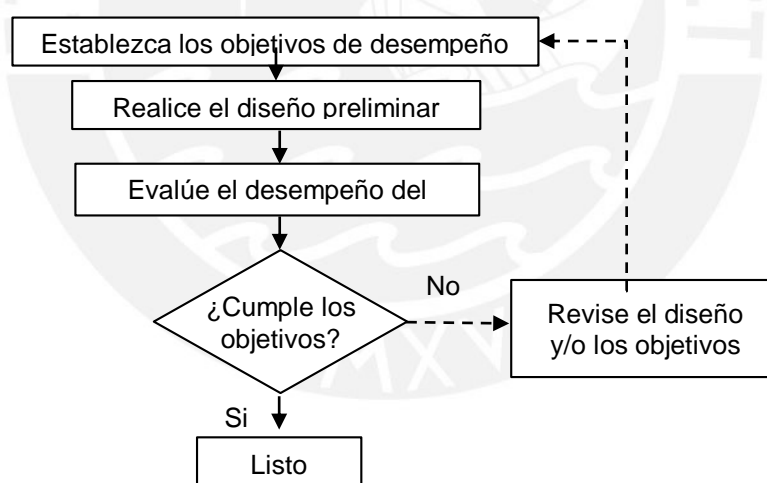


Figura 4. Flujograma del proceso de diseño basado en desempeño.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de edificios de muros de ductilidad limitada (EMDL) en la costa central del Perú*, quien lo adaptó de FEMA P-58-1 (FEMA, 2018).

En el caso de edificaciones existentes, el análisis por desempeño tiene por objetivo analizar la vulnerabilidad real para estimar las pérdidas que sufrirá para determinadas

intensidades sísmicas o proponer acciones correctivas que alineen el comportamiento de la estructura con los objetivos definidos de niveles de daños.

La vulnerabilidad sísmica de una estructura puede ser obtenida mediante parámetros determinísticos de forma discreta a través de una Matriz de Probabilidad de Daño (DPM, por sus siglas en inglés) o mediante parámetros probabilísticos mediante los cálculos de curvas de fragilidad que muestran la probabilidad de que se exceda un nivel de daño para intensidades sísmicas definidas. Asimismo, también se estiman las pérdidas o costos de reparación a través de curvas de vulnerabilidad.

El desempeño sísmico de una estructura está relacionado a estados de daños de una estructura. En la tabla 1 se comparan los principales estados de daños definidos por diversas investigaciones en la que se establece que el parámetro ingenieril más adecuado para representar la respuesta estructural es a través de la deriva de entrepiso para modelos analíticos (Rossetto y Elnashai, 2003).

Tabla 1. Comparación de estados de daños para diferentes investigaciones.

HRC	HAZUS (FEMA 2003)	VISIÓN 2000 (SEOAC 1995)	ATC 13 (FEMA, 1985)
Sin daño	Sin daño	Sin daño	Sin daño
Leve	Leve	Completamente Operacional	Muy Leve
Ligero		Operacional	Leve
Moderado	Moderado	Seguridad de la vida	Moderado
Frecuente	Frecuente	Cerca al colapso	Severo
Colapso parcial		Colapso	Colapso
Colapso	Colapso		

Nota. Tomado de “Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data”, por Rossetto y Elnashai, 2003.

Se tienen 4 formas de estimar la vulnerabilidad sísmica de una estructura. Cuando ya se tiene registros del comportamiento de la estructura ante sismos se utiliza la metodología empírica. Otra metodología es a través de la estimación criterios basados en la opinión de expertos. La tercera metodología es analítica pues se pretende entender el comportamiento sísmico a través de modelos matemáticos. Finalmente, la metodología híbrida consiste en combinar la metodología empírica y la analítica (Crowley et al., 2006).

Los modelos analíticos pueden variar por su complejidad. La principal ventaja de los modelos simplificados es su mejor entendimiento debido al uso de pocos parámetros para estudiar el comportamiento de la estructura y representar sus estados límites de daño (Rossetto y Elnashai, 2003) (Crowley et al., 2006). Además, se requiere menor capacidad operacional y tiempo, lo que permite realizar mayor cantidad de variantes de análisis. Por otro lado, para modelos analíticos estructurales más complejos se puede utilizar análisis estático lineal, estático no lineal, dinámico lineal o dinámico no lineal. No obstante, para cualquier modelo que se examine siempre se debe considerar la variación de los parámetros que se utilizan, pues pueden generar una sobrevaloración o subvaloración de los resultados (Reyes, 2017).

2.4. Antecedentes

Los muros de ductilidad limitada se han desarrollado en los últimos años y su principal uso se da en los denominados Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (E.M.D.L.) por lo que las principales investigaciones se han enfocado en el estudio de edificaciones mayores a 5 pisos y no a viviendas de 2 o 3 pisos.

En el año 2006 aún no se tenía un consenso respecto al desempeño sísmico de esta tipología, es por ello que Delgado y Peña (2006) realizaron un primer estudio de desempeño basado en la opinión de expertos. Se estudiaron edificaciones de 5 pisos (figura 5) y 7 pisos

(figura 6) a través de la recolección y tratamiento de información mediante el método Delphi y cuyos estados de daños se establecieron con base al reporte ATC-13 (FEMA, 1985) que son: Muy leve, leve, moderado, alto y severo y para magnitud de intensidades de Mercalli Modificada.

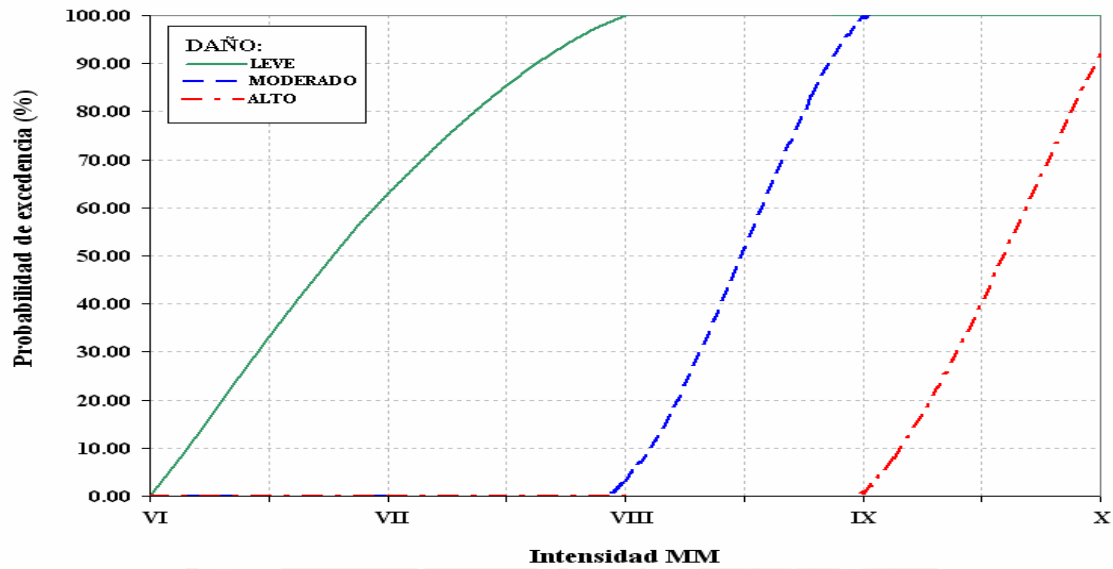


Figura 5. Curvas de Fragilidad para edificios de EMDL de 5 pisos.

Tomado de Delgado y Peña (2006) *Edificios Peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada.*

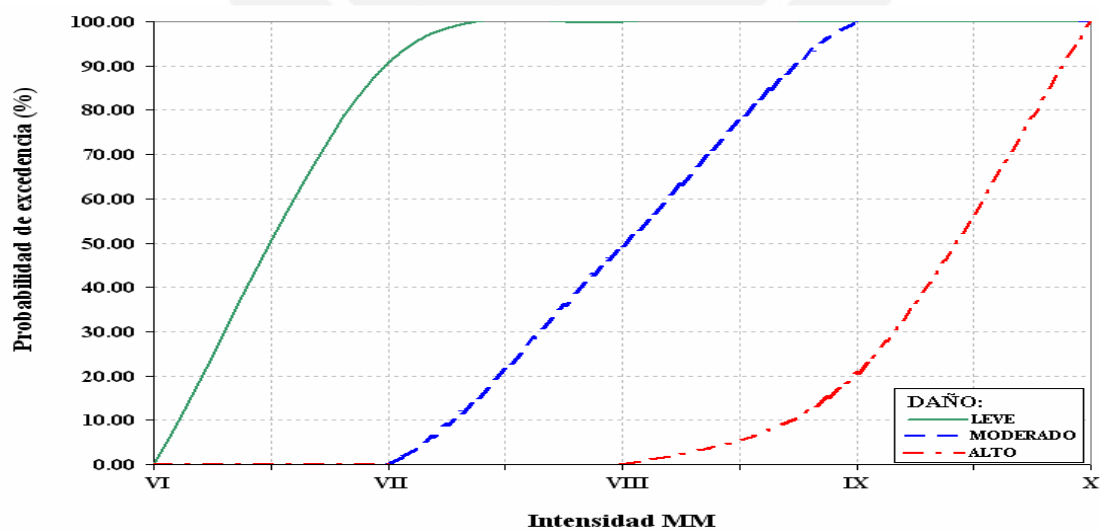


Figura 6. Curvas de Fragilidad para edificios de EMDL de 7 pisos.

Tomado de Delgado y Peña (2006) *Edificios Peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada.*

De acuerdo con los datos obtenidos de las figuras 5 y 6 y teniendo como base los factores de daños del reporte ATC-13 (FEMA, 1985) se elaboraron las curvas de vulnerabilidad para los edificios analizados.

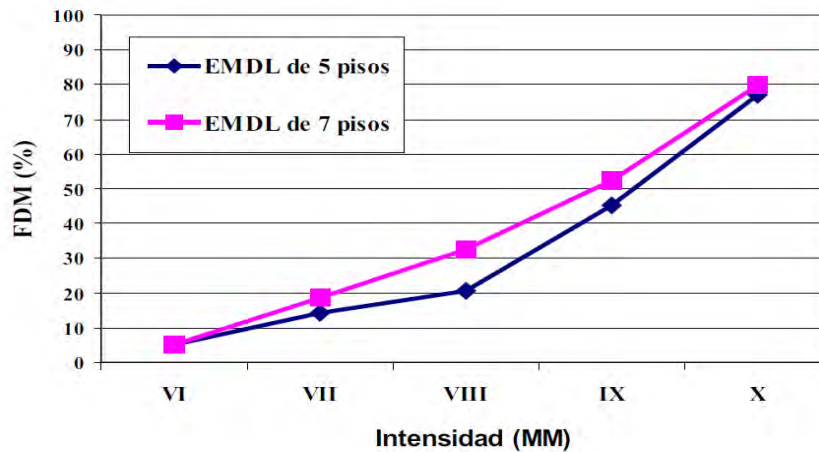


Figura 7. Estimación de daños para edificios de 5 y 7 pisos de EMDL para diferentes intensidades sísmicas.

Tomado de Delgado y Peña (2006) *Edificios Peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada*.

En la figura 7 se observa la similitud de los resultados obtenidos para edificaciones de 5 y 7 pisos tanto para sismos de escalas bajas y altas. Se estima la misma magnitud de daño para ambas tipologías, sin embargo, para intensidades intermedias el edificio de 5 pisos sufre mayores daños.

Gálvez (2008) realizó el estudio analítico del comportamiento de los EMDL debido a las diferencias con los muros tradicionales de concreto armado y propuso un factor de reducción (R) igual a 4 para esta tipología basado en la metodología del reporte ATC-63 (FEMA, 2009). Asimismo, en el año 2010 obtuvo una curva de fragilidad de un modelo no lineal de un edificio de muros de ductilidad limitada de 5 pisos (figura 8).

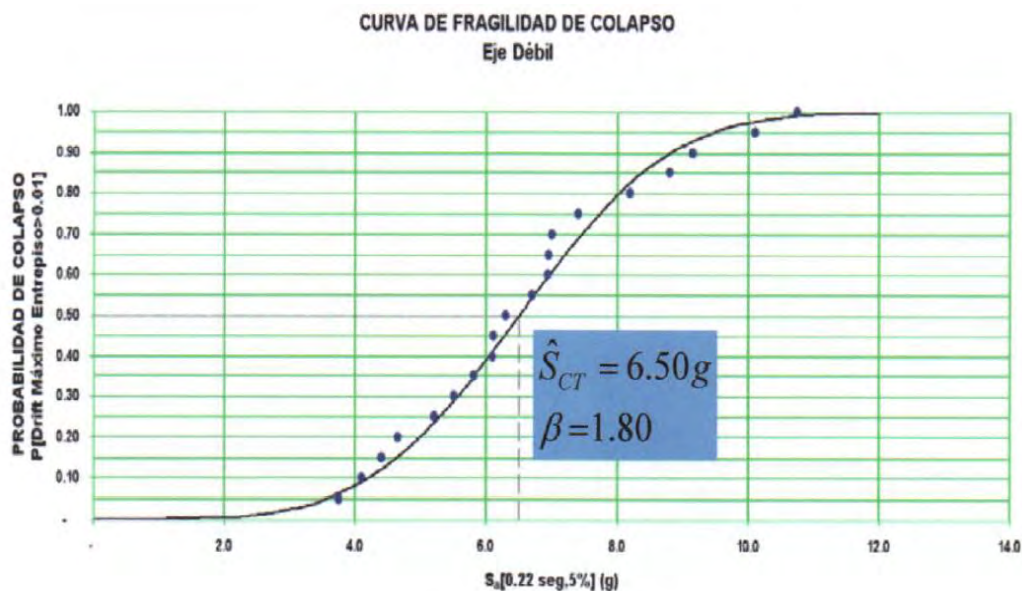


Figura 8. Curva de fragilidad de colapso de un edificio de muros de ductilidad limitada de 5 pisos.

Tomado de Gálvez (2010) *Viviendas económicas de concreto con mallas electrosoldadas*.

Por otro lado, Gonzales (2010) estudio el desempeño sísmico de 7 edificios de diferentes plantas y números de pisos de Muros de Ductilidad Limitada para la ciudad de Lima. Se estudiaron las respuestas a través del análisis Pushover y dinámicos no lineales de los siguientes parámetros: deformación a cortante de las vigas, giro de rótulas plásticas de los muros, desplazamiento máximo entre plantas, deformación del acero inferior, deformación del acero superior, desplazamiento máximo entre plantas, deformación del hormigón inferior y deformación del hormigón superior. El resultado de esta investigación (tabla 2) propone estados límites de daños a través del parámetro de deformación a tracción del acero y del desplazamiento entre plantas.

Tabla 2.

Propuesta de estados límites en función de la deformación a tracción del acero y del desplazamiento entre plantas.

Estados límites considerados	Deformación a tracción (%)	Desplazamiento entre plantas (%)
Daño leve (IO)	0,2 – 0,6	0 – 0,25
Daño moderado (LS)	0,6 – 1,6	0,25 – 0,375
Daño severo (CP)	1,6 – 2,6	0,375 – 0,50

Nota. Tomado de “Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón.

Aplicación a zonas de alta sismicidad”, por Gonzales, 2003.

Reyes (2017) realizó el estudio de vulnerabilidad de un edificio de 5 pisos basado en la primera edición del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) y del Análisis Dinámico Incremental (Vamvatsikos y Cornell, 2002). Se obtuvieron curvas de fragilidad para sismos frecuentes, ocasionales, raros y muy raros definidos por Muñoz, Tinman y Quiun (2013) y los estados de daños basados en la propuesta de Gonzales (2010). En la figura 9 se muestran las curvas de fragilidad obtenidas en esta investigación y en la tabla 3 los valores de las medianas y dispersiones de los mismos. Además, la figura 10 muestra los daños estimados para los sismos definidos y la figura 11 la curva de vulnerabilidad que estima los costos de reparación

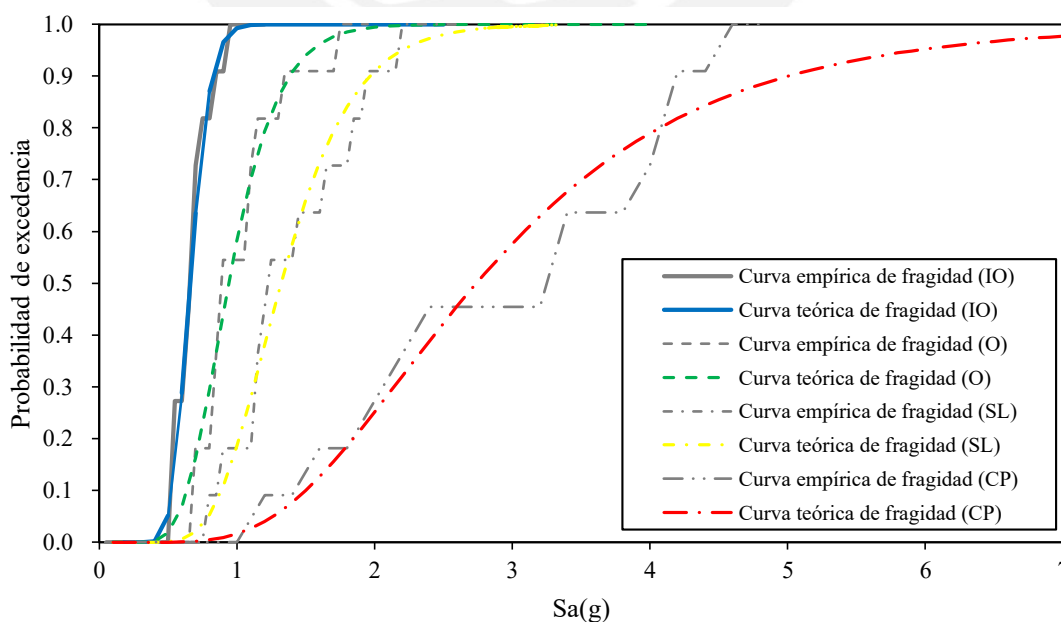


Figura 9. Curvas de fragilidad de EMDL de 5 pisos.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

Tabla 3. Valores de Curva de fragilidad para diversos estados de daños en EMDL.

Estado de daño	Mediana (Sa(g))	Dispersión
Operacional (O)	0.66	0.17
Inmediatamente Operacional (IO)	0.94	0.30
Resguardo de la vida (SL)	1.32	0.31
Cerca al Colapso (CP)	2.74	0.47

Nota. Tomado de “Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú”, por Reyes, 2017.

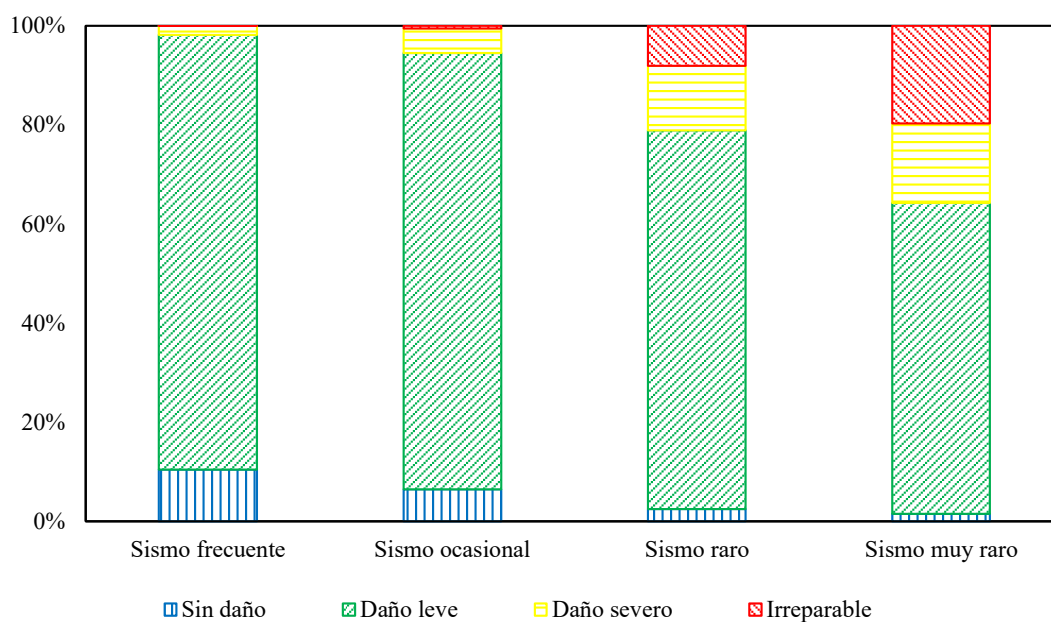


Figura 10. Estado de daños de muros para diversos sismos.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

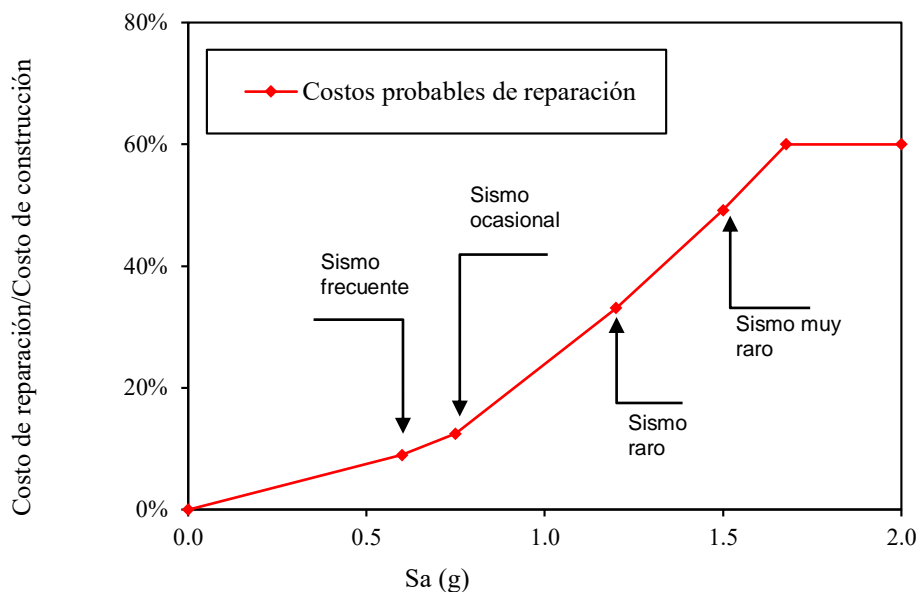


Figura 11. Curva de vulnerabilidad de reparación.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

López y Rodríguez (2018) realizan la generación de curvas de fragilidad para una vivienda unifamiliar de 3 pisos y tres viviendas unifamiliares adosadas de 2 niveles. En las figuras 12 y 13 se muestran las curvas de fragilidad obtenidas para las 2 tipologías analizadas.

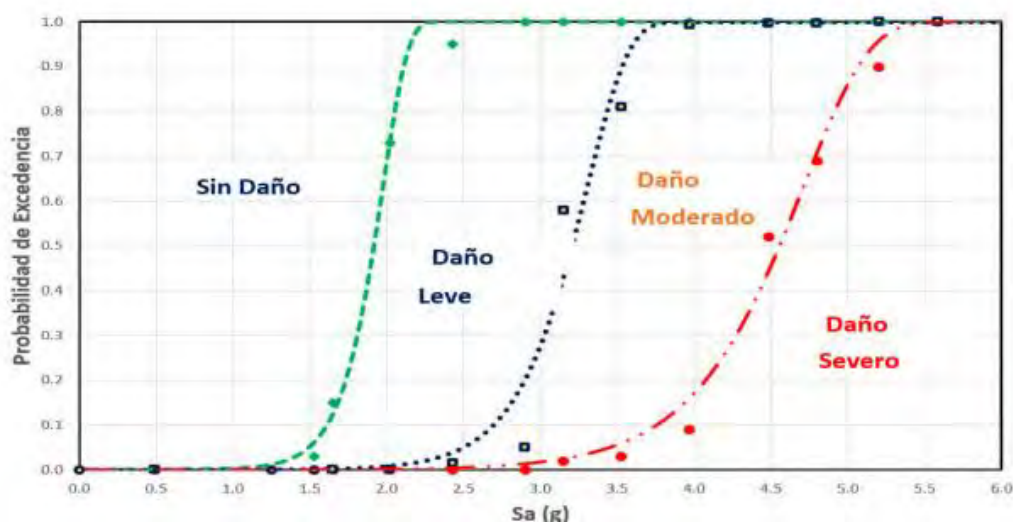


Figura 12. Curvas de fragilidad para la vivienda unifamiliar de muros de ductilidad limitada de 3 pisos.

Tomado de López y Rodríguez (2018) *Construcción de curvas de fragilidad para viviendas unifamiliares de muros de Ductilidad Limitada.*

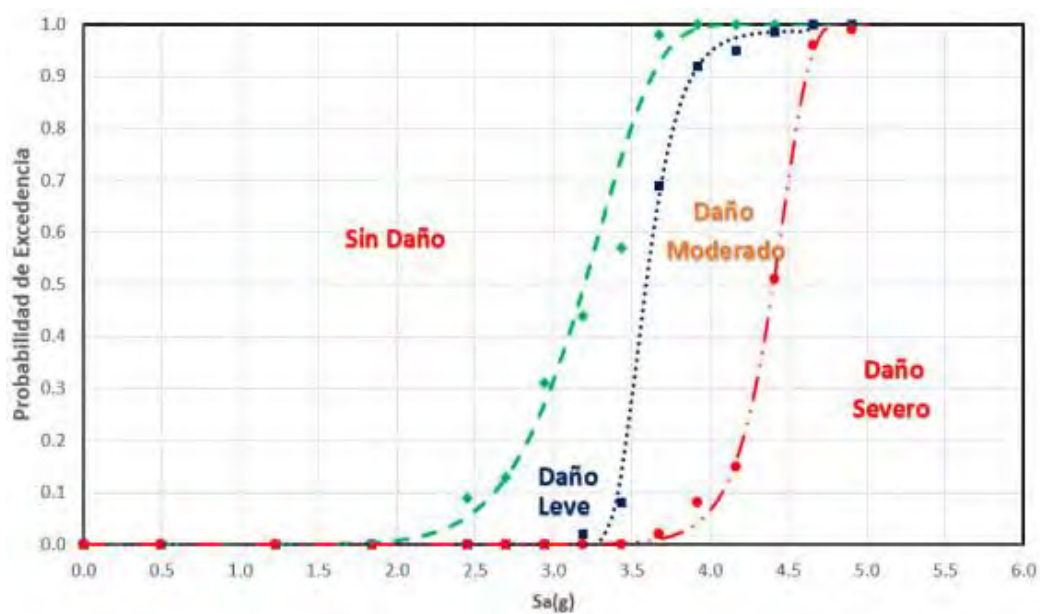


Figura 13. Curvas de fragilidade para a vivenda unifamiliar de muros de ductilidade limitada de 2 pisos.

Tomado de López y Rodríguez (2018) *Construcción de curvas de fragilidade para viviendas unifamiliares de muros de Ductilidade Limitada*.

3. Metodología y Aplicación de la Investigación

3.1. Metodología de la Investigación

La metodología utilizada es la que propuso Reyes (2017) y que tiene como base la primera edición del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) y el Análisis Dinámico Incremental (Vamvatsikos y Cornell, 2002). La Metodología contiene los siguientes pasos:

- Caracterización de tipología: tiene como finalidad obtener una o más estructuras que sea/sean la/las más representativa(s).
- Curvas de fragilidad: se realiza un modelo numérico no lineal el cuál será sometido a demandas sísmicas características de la región donde se encuentre la tipología.
- Curvas de vulnerabilidad: se determinan las intensidades sísmicas características de la región y media el PACT del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) se simulan los costos de reparación estimados.

3.2. Aplicación de la metodología

3.2.1. Tipología propuesta.

La tipología propuesta (figura 14) tiene como base los estudios previos de caracterización de viviendas unifamiliares de muros de ductilidad limitada realizados por la Consultora Suyo (2013) y por López y Rodríguez (2018). El prototipo está constituido por 3 viviendas unifamiliares adosadas de dos pisos de 3.60 m de ancho por 8.00 m de largo cada una y una altura de entrepiso de 2.5 m haciendo un total de longitud de la planta en el eje X es de 10.75 m. y en el eje Y tiene una longitud de 8.00 m, y un total de 86.4 m² de área de planta. Además, la tipología propuesta no posee simetría respecto al eje X ni al eje Y; asimismo, tampoco presenta irregularidad de planta ni altura.

El concreto utilizado en los muros de ductilidad limitada posee un esfuerzo de compresión (f'_c) de 210 kg/cm² y está reforzado por mallas de acero corrugado grado 60 de esfuerzo de fluencia (f_y) de 4200 kg/cm² y de diámetro 3/8 cada 20 cm., y los bordes se

encuentran reforzados por 4 barras de acero de 1/2" de diámetro. Además, la tipología presenta losas macizas de 12 cm. para cada piso que funcionan como diafragmas rígidos, asimismo, la cimentación es de cimientos reforzados de entre 60 a 80 cm de espesor considerando un suelo intermedio tipo II (Consultora Suyo, 2013) El periodo fundamental de vibración en el eje X es de 0.095 segundos y en el eje Y de 0.030 segundos.

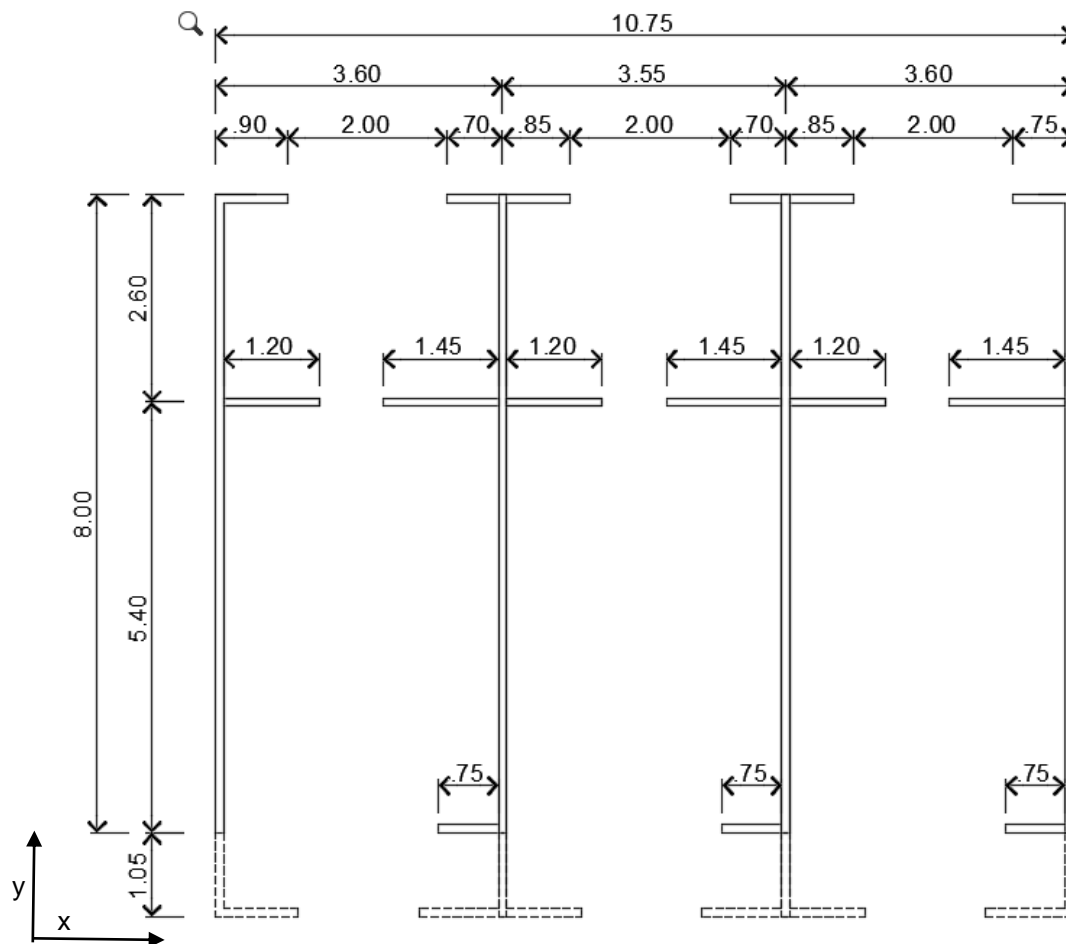


Figura 14. Planta típica representativa de vivienda de muros de ductilidad limitada de dos niveles.

Adaptado de Consultora Suyo (2013) *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Primera Fase: Edificaciones típicas de vivienda popular unifamiliar y multifamiliar.*

3.2.2. Curva de fragilidad.

3.2.2.1 Demandas sísmicas.

De acuerdo al reporte del FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) se requiere definir un espectro que sea representativo a las características sísmicas del lugar que generalmente es el espectro de diseño de la norma del país. Luego se seleccionan 7 registros sísmicos cuyas medias geométricas de los espectros sean similares al espectro representativo en el rango entre la quinta parte y el doble del periodo fundamental de vibración de la estructura; no obstante, si no se logra ello se requiere utilizar mínimamente 11 registros sísmicos.

En la tabla 4 se muestran los registros más representativos y de mayor intensidad de los terremotos de Perú y Chile (Muñoz et al., 2013).

Tabla 4. Registros sísmicos seleccionados

Registro sísmico	Fecha	Estación	Institución
Lima 1966	17 de Octubre de 1966	Parque de la Reserva	CISMID-UNI
Huaraz 1970	31 de Mayo de 1970	Parque de la Reserva	CISMID-UNI
Lima 1974	5 de Enero de 1974	Zárate	CISMID-UNI
Lima 1974	3 de Octubre de 1974	Parque de la Reserva	CISMID-UNI
Lima 1974	9 de Noviembre de 1974	La Molina	CISMID-UNI
Antofagasta 1995	30 de Julio de 1995	CHAN 1	RENADIC-U. Chile
Punitaqui 1997	14 de Octubre de 1997	CHAN 1	RENADIC-U. Chile
Arequipa 2001	23 de Junio de 2001	César Vizcarra Vargas	CISMID-UNI
Pisco 2007	15 de Agosto de 2001	UNICA	CISMID-UNI
Tocopilla 2007	14 de Noviembre de 2007	CHAN 1	RENADIC-U. Chile
Iquique 2014	01 de Abril de 2014	MNMCX	CSN-U. Chile

Nota. Tomado de “Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de

Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú”, por Reyes, 2017.

En la figura 15 se muestran los espectros de pseudoaceleraciones para el registro sísmico Lima 1966 para las dos componentes horizontales y su media geométrica realizado por Reyes (2017). Por otro lado, la figura 16 muestra las medias geométricas de los espectros de pseudoaceleración de los 11 registros sísmicos seleccionados para el rango de 0.02 a 0.2 segundos para la tipología seleccionada de período fundamental de vibración de 0.095 segundos

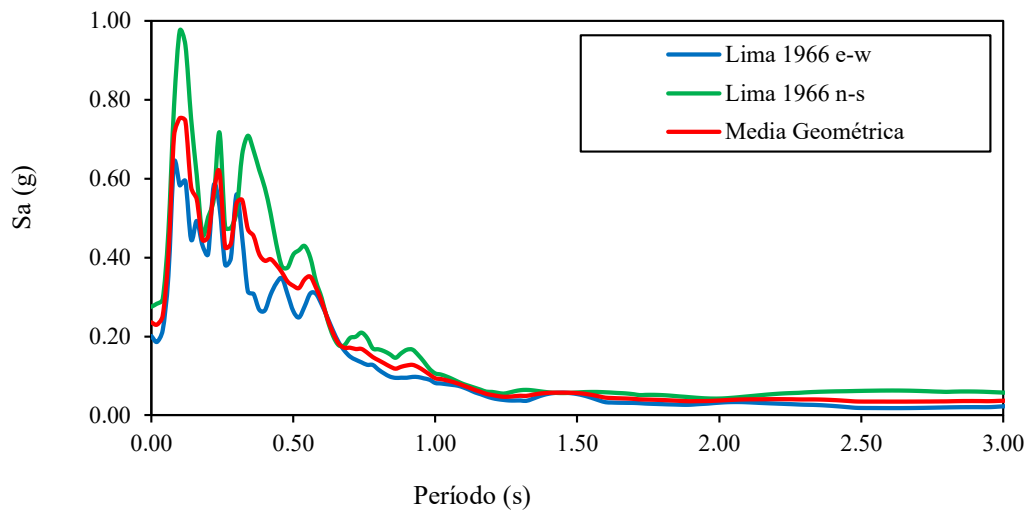


Figura 15. Media geométrica de los espectros de los registros horizontales del sismo Lima 1966.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

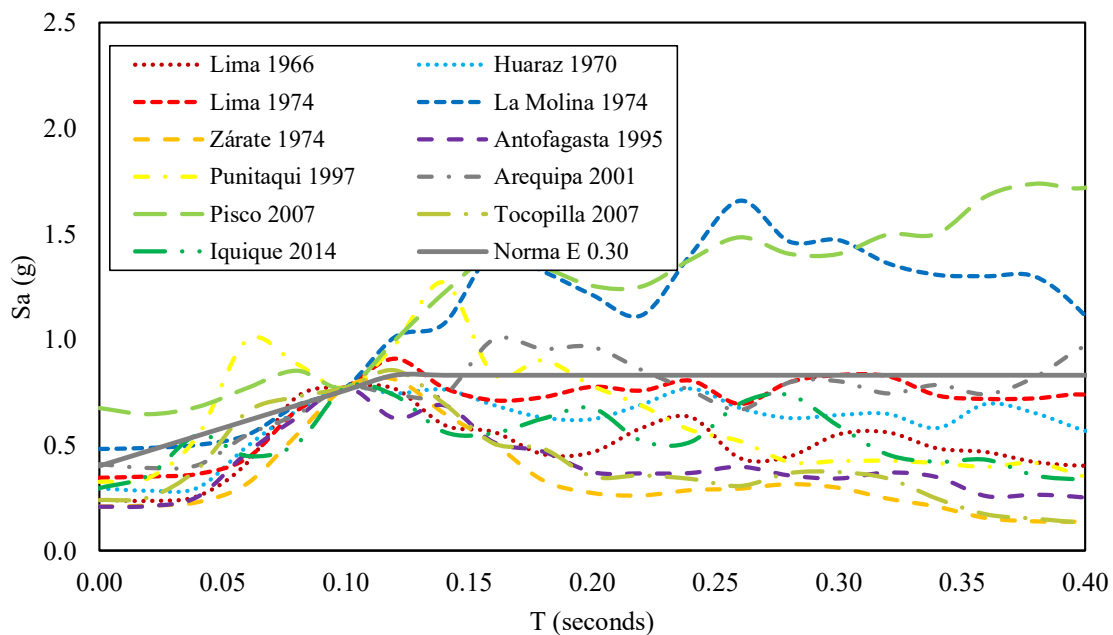


Figura 16. Comparación de los espectros de pseudoaceleración de los 11 sismos seleccionados.

3.2.2.2 Modelo numérico de la tipología.

El prototipo está conformado por muros de ductilidad limitada que resisten sismos mediante el modelo de fibras en ambas direcciones. Además, están conectados mediante

diafragmas rígidos en los dos niveles donde se considera el 100% de la masa de la carga muerta y el 25% de la carga viva en cada nivel.

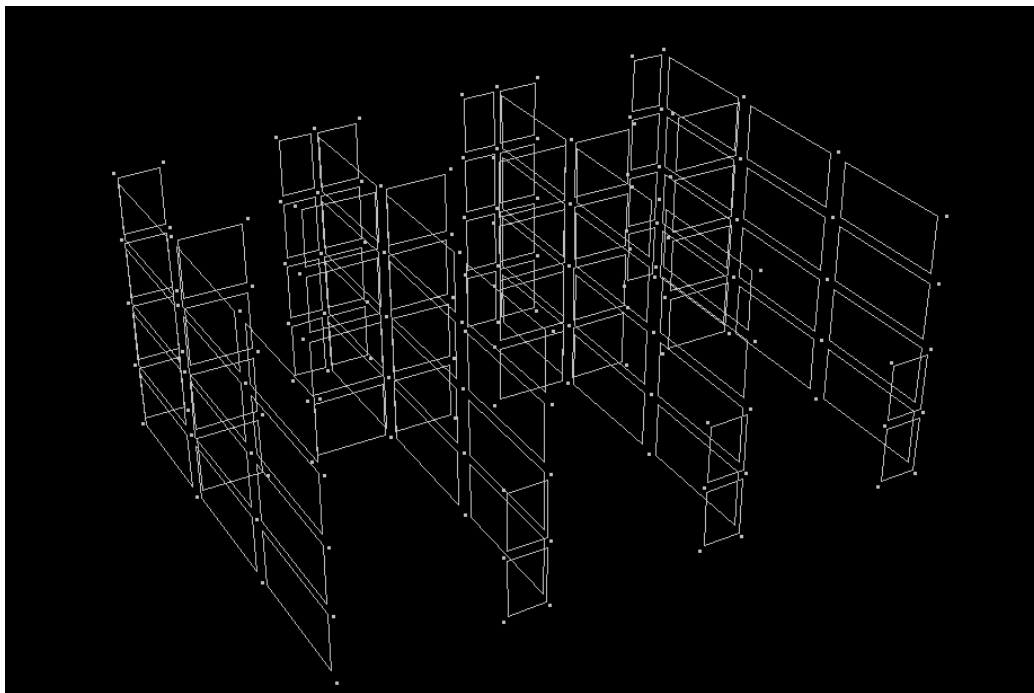


Figura 17. Modelo del prototipo conformado por muros en el programa Perform 3D.

3.2.2.3 *Relaciones constitutivas de los materiales.*

a. Modelo constitutivo del acero corrugado.

Se utilizó el modelo de Kent y Park de 1985 para representar el modelo constitutivo del acero a tracción y compresión y se utilizan valores característicos obtenidos de investigaciones ocurridos en nuestro país (figura 18). Se muestran las principales características (Reyes, 2017):

- El rango de comportamiento elástico se da hasta la resistencia de fluencia de 4200 kg/cm² y la deformación unitaria axial de 0.0021.
- La resistencia de fluencia es de 4200 kg/cm² y su plataforma se da en el rango de deformaciones unitarias axiales de 0.0021 hasta 0.00525.
- La curva de endurecimiento se inicia en la deformación unitaria axial de 0.00525 y hasta su resistencia máxima y última de 7000 Kg/cm² cuando se tiene una deformación unitaria axial de 0.07.

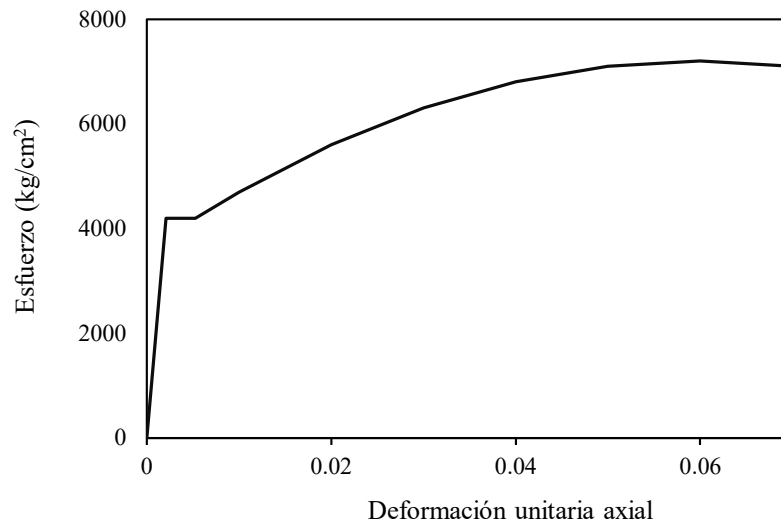


Figura 18. Relación esfuerzo deformación del acero de tracción y compresión.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

b. Modelo constitutivo del concreto

Para representar el comportamiento del concreto no confinado de los muros de ductilidad limitada se ha utilizado el modelo de Mander de 1988 (figura 19) por su simplicidad en la que se desprecia la resistencia a tracción del concreto. Se muestran las principales características (Reyes, 2017):

- El tramo inicial forma una parábola hasta una resistencia a compresión de 210 kg/cm^2 y una deformación unitaria axial de 0.002.
- El tramo final está constituido por una recta descendente hasta alcanzar una resistencia 150 kg/cm^2 y una deformación unitaria axial de 0.003.

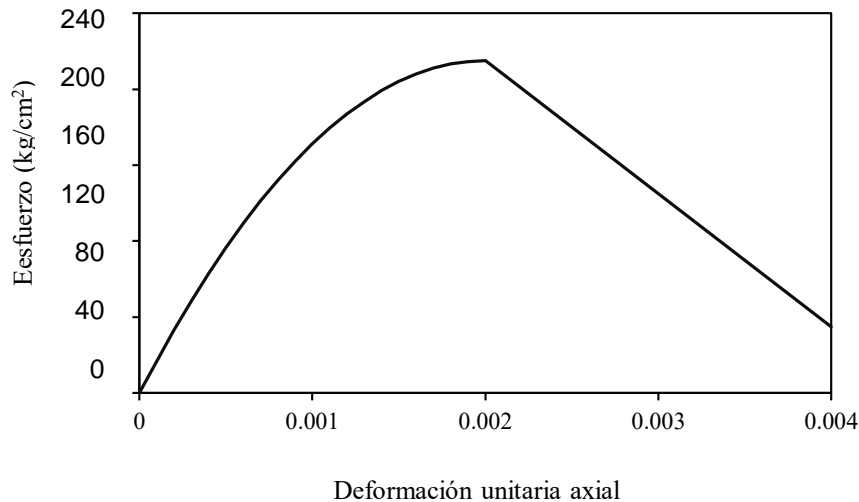


Figura 19. Relación esfuerzo- deformación del concreto.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

c. Modelo constitutivo a corte de muro de ductilidad limitada

Para representar el comportamiento a corte de los muros de ductilidad limitada se ha utilizado el modelo trilineal propuesto por Gerin y Adebar (2004) en concordancia a la investigación elaborada por Gonzales (2010) que se basa en los ensayos realizados por Medina (2005). Se muestran las principales características (Reyes, 2017) en la figura 2o:

- El tramo preliminar está conformado por una recta ascendente con deformación tangencial despreciable hasta que se alcance el esfuerzo cortante de fisuración de 60 ton/m².
- El primer tramo está conformado por una recta ascendente hasta alcanzar el esfuerzo cortante máximo de 175 ton/m² para una deformación tangencial de 0.0024.
- El segundo tramo es una recta horizontal con el esfuerzo máximo hasta una deformación tangencial de 0.0045.
- El tercer tramo está conformado por una recta descendente hasta alcanzar un esfuerzo cortante de 65 ton/m² para una deformación tangencial de 0.013.

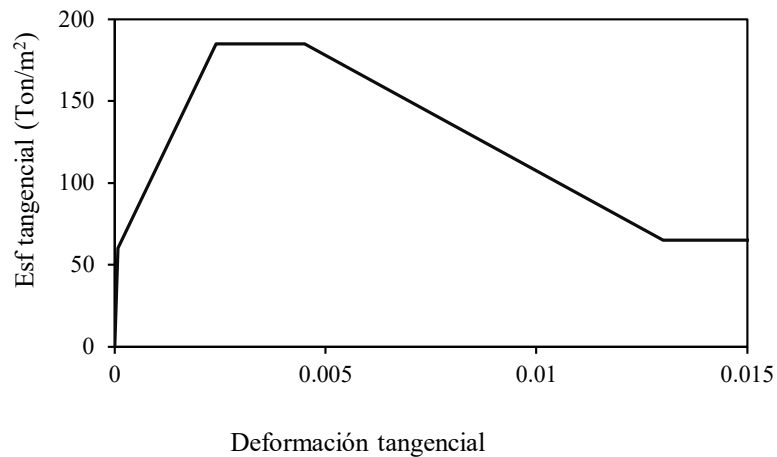


Figura 20. Relación esfuerzo-deformación por corte.

Tomado de Gonzales (2010) *Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón. Aplicación a zonas de alta sismicidad.*

3.2.2.4 Modelo no lineal de los muros.

Para el modelamiento de los muros se ha utilizado el modelo de fibras para representar el comportamiento a flexión. Este análisis separa el comportamiento del concreto y del acero (figura 21) en secciones más pequeñas que posee las relaciones constitutivas de los materiales. Se pueden modelar mediante fibras dividiendo los muros en elementos verticales y/o longitudinales más pequeños (figura 22a y 22b). Asimismo, el comportamiento a corte del muro se definió a través del modelo de corte del muro de acuerdo al modelo constitutivo definido (figura 22c).

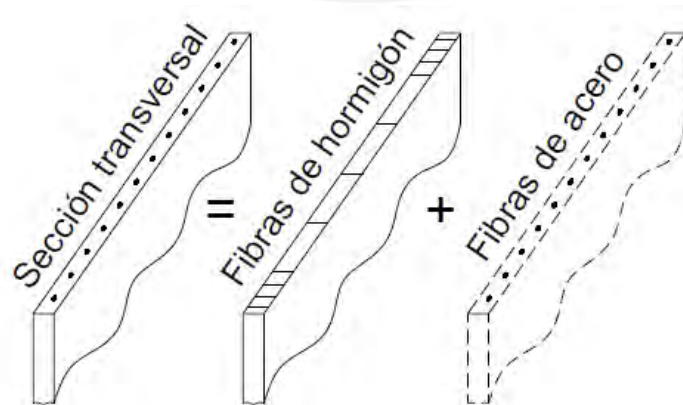


Figura 21. Modelamiento de muros a través de fibras.

Tomado de Gonzales (2010) *Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón. Aplicación a zonas de alta sismicidad.*

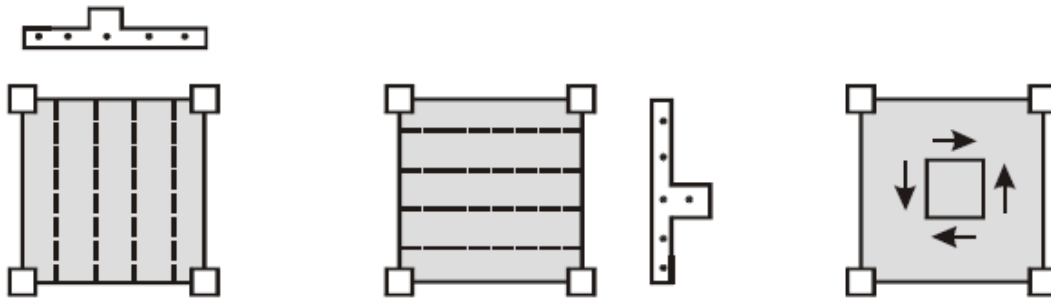


Figura 22. Modelo de fibras (a) verticales, (b) horizontales y (c) modelo de corte.

Tomado de Computers and Structures Inc. (2006). *Perform Components and Elements for Perform-3d and Perform-Collapse.*

En el modelamiento de muros, la generación de las rótulas plásticas se produce en las zonas inferiores pudiendo ser en parte de la altura del muro del primer piso o de forma conservadora se podría considera todo el primer nivel (Paulay y Priestley, 1992), (ASCE, 2000) como se muestra en la figura 23. En la zona de rótula plástica el comportamiento del muro es inelástico, mientras que en la zona fuera de las rótulas plásticas se consideran un comportamiento elástico.

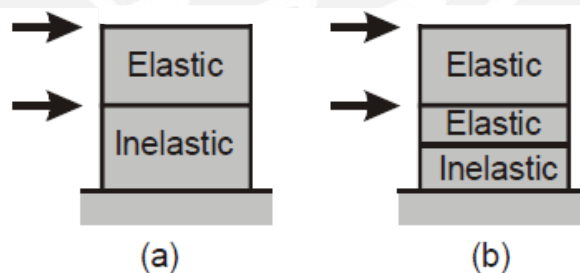


Figura 23. (a) rótula plástica en el primer nivel y (b) rótula plástica en la zona inferior del primer nivel.

Tomado de Computers and Structures Inc. (2006). *Perform Components and Elements for Perform-3d and Perform-Collapse.*

Con el modelo de fibras se obtiene mayor precisión de los resultados; sin embargo, ocasiona un mayor gasto operacional. Por este motivo se ha utilizado el modelo de fibras, pero

con una partición de 2 secciones horizontales por cada nivel debido a que con ello se logra un 94% de precisión como se muestra en la figura 24 (Computers and Structures Inc., 2006).

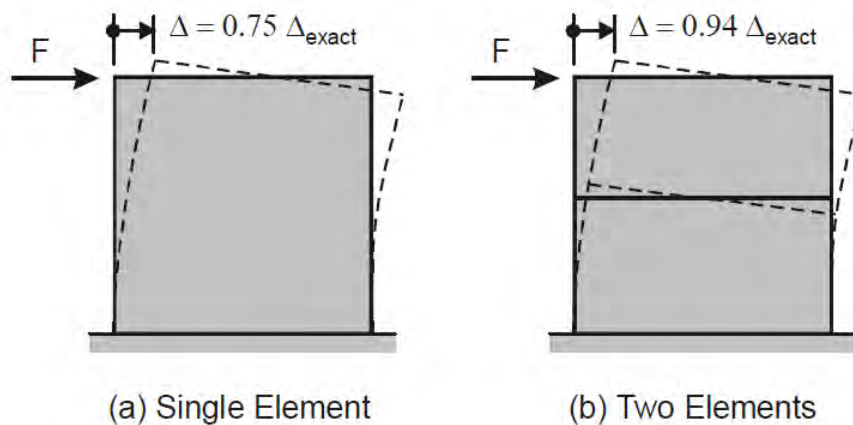


Figura 24. (a) 1 sección (b) 2 secciones

Tomado de Computers and Structures Inc. (2006). *Perform Components and Elements for Perform-3d and Perform-Collapse*.

3.2.2.5 Amortiguamiento estructural.

Todas las estructuras poseen amortiguamiento estructural debido a que es un mecanismo de liberación de energía inherente a ellas y que se generan debido al amortiguamiento viscosos de los materiales, a la fricción de la interacción entre ellos y del amortiguamiento histerético de los elementos estructurales (Chopra, 2014).

Modelar el amortiguamiento estructural es muy complejo por ello se suele considerar el amortiguamiento viscoso el cual es el que tiene mayor preponderancia. El método de Rayleigh es uno de los representativos que lo relaciona con los amortiguamientos modales y la matriz de masa y de rigidez (ecuación 2) (Chopra, 2014), según la ecuación:

$$c = \alpha M + bK \quad \text{Ecuación 2}$$

Entonces, el amortiguamiento del n-ésimo modo de vibración (ecuación 3) es:

$$\xi_n = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\omega_n} + \frac{\beta}{2} \omega_n \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde ω_n es la frecuencia natural para el n-ésimo modo de vibración. Los coeficientes α (ecuación 4) y β (ecuación 4) se definen según las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \xi \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i+\omega_j} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\beta = \xi \frac{2}{\omega_i+\omega_j} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde ω_i y ω_j son las 2 frecuencias naturales principales de vibración de la estructura y ξ tiene un valor de 5%. En la figura 25 se muestra el amortiguamiento de Rayleigh para el caso analizado.

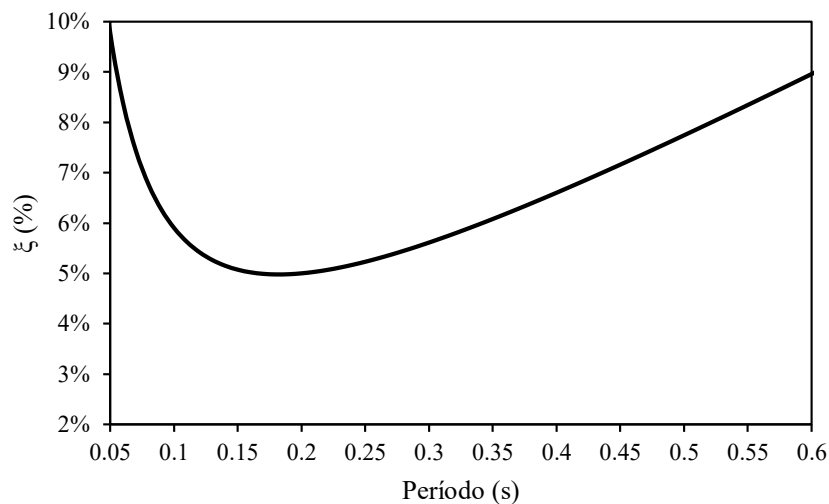


Figura 25. Amortiguamiento de Rayleigh.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

3.2.2.6 Degradación cíclica.

Con base en los estudios realizado por el Laboratorio de Estructuras PUCP (2016), Reyes (2017) elaboró la calibración de la degradación cíclica de los de ductilidad limitada. En la figura 26a se muestra la calibración del muro por desplazamientos laterales y sin ninguna carga vertical lo que representaría las características de los muros de los últimos pisos de una edificación; asimismo, la figura 26b muestra la calibración por desplazamientos laterales del

muro que fue sometido a 300 KN de carga vertical previamente lo que representaría el comportamiento de los muros de los primeros pisos.

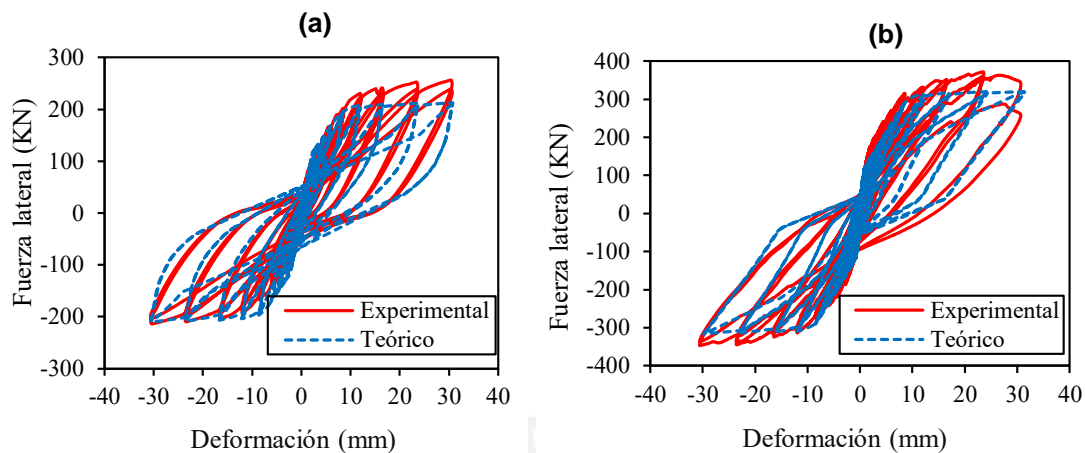


Figura 26. Degradación cíclica para: (a) un muro sin carga de gravedad, (b) muro sometido a 300 KN de carga de gravedad.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

3.2.3. Curva de fragilidad de la tipología.

3.2.3.1 Análisis dinámico incremental.

El análisis dinámico incremental consiste en someter a la estructura a registros sísmicos, los que se van incrementando con el objetivo de comprender la evolución del comportamiento de la estructura frente a estos cambios (Vamvatsikos y Cornell., 2002). Con este análisis se obtiene resultados en tiempo-historia del desempeño de la estructura ante el incremento de demandas sísmicas desde un comportamiento elástico hasta que la tipología colapse (Reyes, 2017).

Por ejemplo, para el caso del registro sísmico de Lima de 1966, en la figura 27 se muestra su espectro de pseudoaceleraciones y para el caso del periodo de 0.095s de la tipología la media geométrica de la pseudoaceleración espectral es de 0.75g. Como se desea obtener para el ejemplo una pseudoaceleración de 1.5g, se multiplica por 2.019.

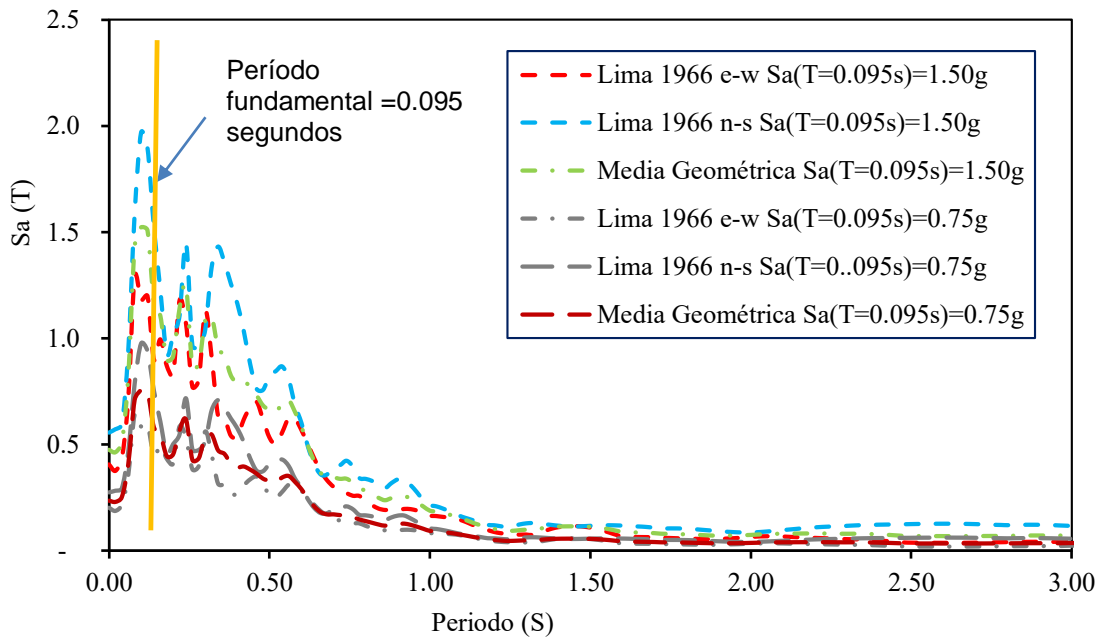


Figura 27. Ejemplo de escalamiento para el registro sísmico de Lima de 1966.

El valor de 2.019 se multiplica a los valores de cada componente (e-w y n-s) del registro sísmico de Lima de 1966. En la figura 28 se muestra el escalamiento de la componente n-s. Asimismo, se observa que para la componente n-w se obtiene un valor de pseudoaceleración de 1.18 y para la componente n-s 1.97, por lo que se asigna la componente n-s al eje X, que es el eje débil de manera conservadora. Asimismo, en la figura 29 se muestra el resulta de la deriva global del eje x al someter la estructura al sismo Lima 1966 escalado descrito.

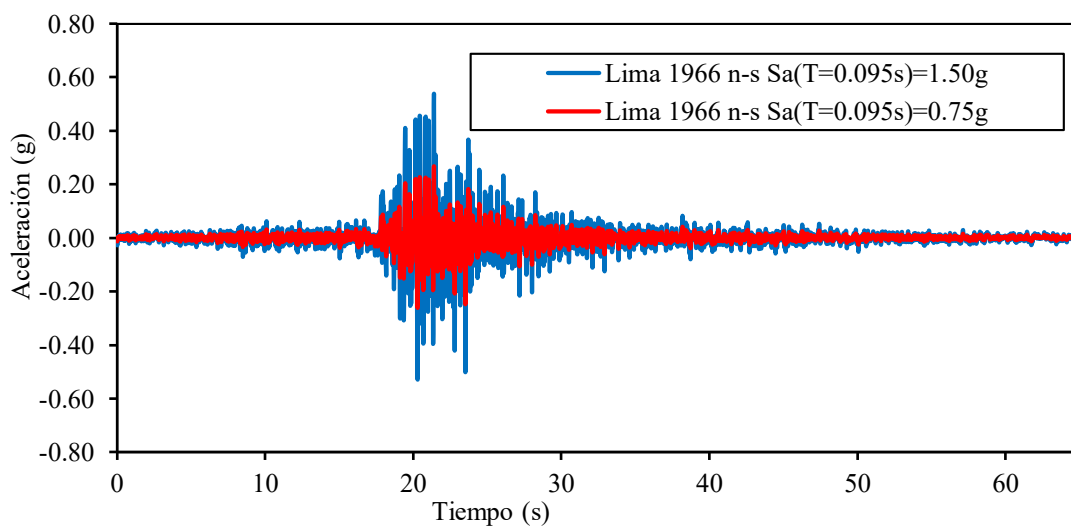


Figura 28. Ejemplo de registro sísmico escalado.

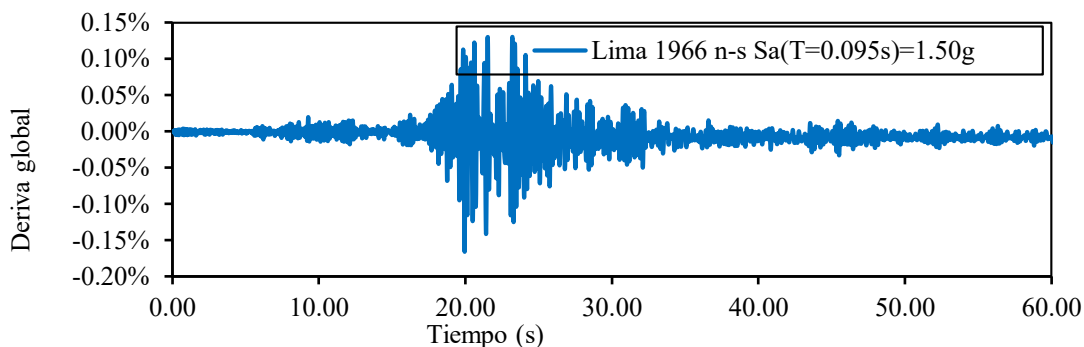


Figura 29. Respuesta de la deriva global del eje x para el sismo Lima 1966 escalado.

De la misma manera se van escalando los registros sísmicos y se obtienen como respuestas las derivas globales máximas. Con estos juegos de valores se van armando curvas de análisis dinámico incremental para cada registro sísmico como se muestra en la figura 30.

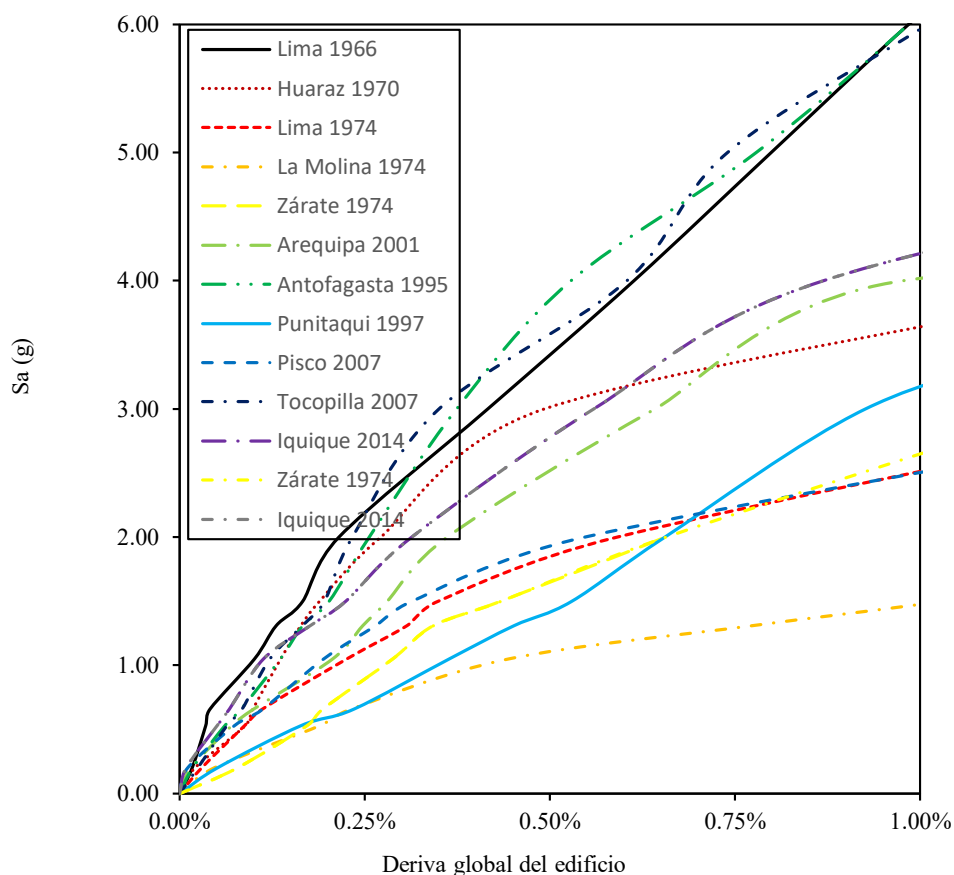


Figura 30. Curvas de análisis dinámico incremental del prototipo.

En la figura 30 se muestra el detalle de las curvas de análisis dinámico incremental obtenidas para los 11 registros sísmicos de la tabla 4 que son las predominantes para la costa de nuestro país y región.

3.2.3.2 Curva de fragilidad.

Los estados de daños definidos por el informe VISIÓN 2000 son operacional, inmediatamente operacional, resguardo de la vida y cerca del colapso (FEMA, 2018). De acuerdo a la metodología del FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) solo se requiere obtener la curva de fragilidad de colapso de la estructura. Para las edificaciones de muros de ductilidad limitada, Gálvez (2008) ha establecido que para una deriva global del 1.00% se considera que la tipología ha colapsado.

Para determinar la curva de fragilidad de colapso se evalúa la cantidad de registros sísmicos para los cuales la estructura ya ha colapsado conforme se aumenta el valor de pseudoaceleración; con ello se obtiene la curva empírica de fragilidad de colapso a la cual se realiza un ajuste con una distribución lognormal (FEMA, 2018) como se muestra en la figura 31 y cuyos valores de mediana y dispersión se detallan en la tabla 5.

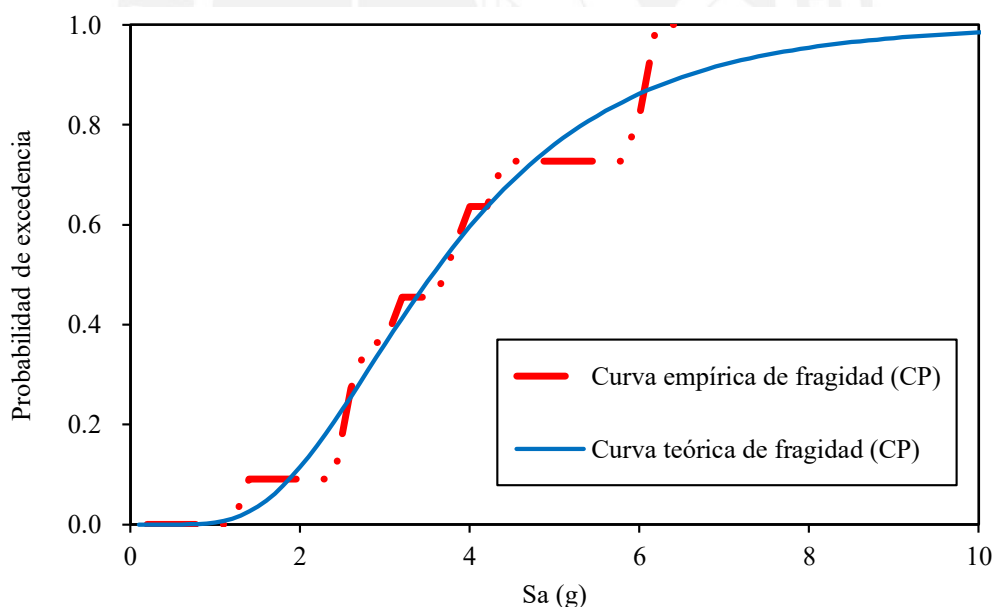


Figura 31: Curvas de fragilidad de colapso de la tipología.

Tabla 5. Valores de Curva de fragilidad para estado de daño de colapso.

Estado de daño	Mediana (Sa(g))	Dispersión
Cerca al Colapso (CP)	3.56	0.48

3.2.3.3 *Curvas de fragilidad de Muros de Ductilidad Limitada (MDL).*

El Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) desarrolló estudios experimentales para definir niveles de estados límites de daños basados en Gulec y Whittaker (2009) al someter un muro rectangular de ductilidad limitada (MDL) ante cargas cíclicas y proponer técnicas de reforzamientos. Además, se desarrollaron curvas de fragilidad para el muro rectangular siguiendo los lineamientos de la primera edición del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018). Los estados límites desarrollados el Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) fueron los siguientes:

a. Estado límite 1.

Está definido por la generación de fisuras de espesor de hasta 0.05 mm. y el inicio del agrietamiento ubicados en los talones de los muros como se muestra en la figura 32 (Laboratorio de Estructuras PUCP, 2016).



Figura 32. Muro en estado de daño límite 1.

Tomado de Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Tercera Fase: Ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros.*

b. Estado límite 2.

Este estado está definido hasta que el muro alcance su resistencia máxima, cuando se han generado fisuras diagonales de hasta 2 mm de espesor y se inicie el aplastamiento del concreto

en las zonas de los talones del muro como se muestra en la figura 33 (Laboratorio de Estructuras PUCP, 2016).

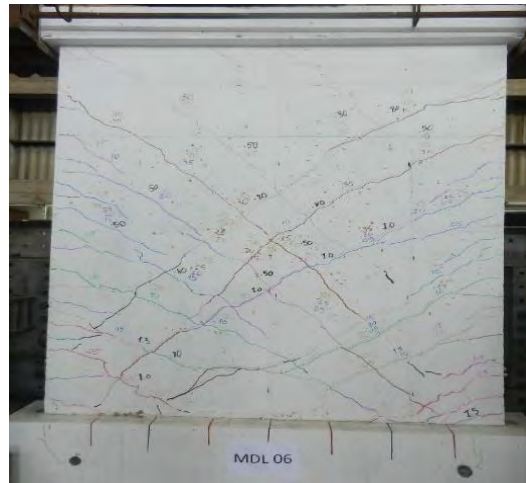


Figura 33. Muro en estado de daño límite 2.

Tomado de Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Tercera Fase: Ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros.*

c. Estado límite 3.

Está definido para cuando el muro alcanza su resistencia última, las grietas diagonales han alcanzado hasta 3 mm, los talones de han aplastado y los aceros podrían haberse pandeado como se muestra en la figura 34 (Laboratorio de Estructuras PUCP, 2016).

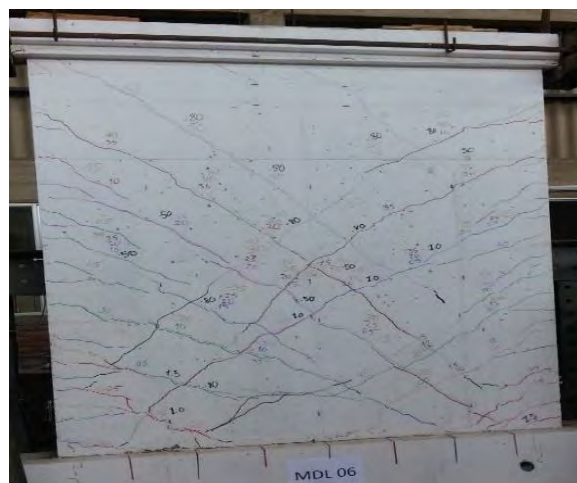


Figura 34. Muro en estado de daño límite 3.

Tomado de Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Tercera Fase: Ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros.*

En la figura 35 se muestran las curvas de fragilidad para los 3 estados límites de daño desarrollado por Laboratorio de Estructuras PUCP (2016); asimismo, también se muestran los tres estados límites de daños obtenidos por Gulec y Whittaker. (2009) para muros rectangulares cuyos resultados son similares.

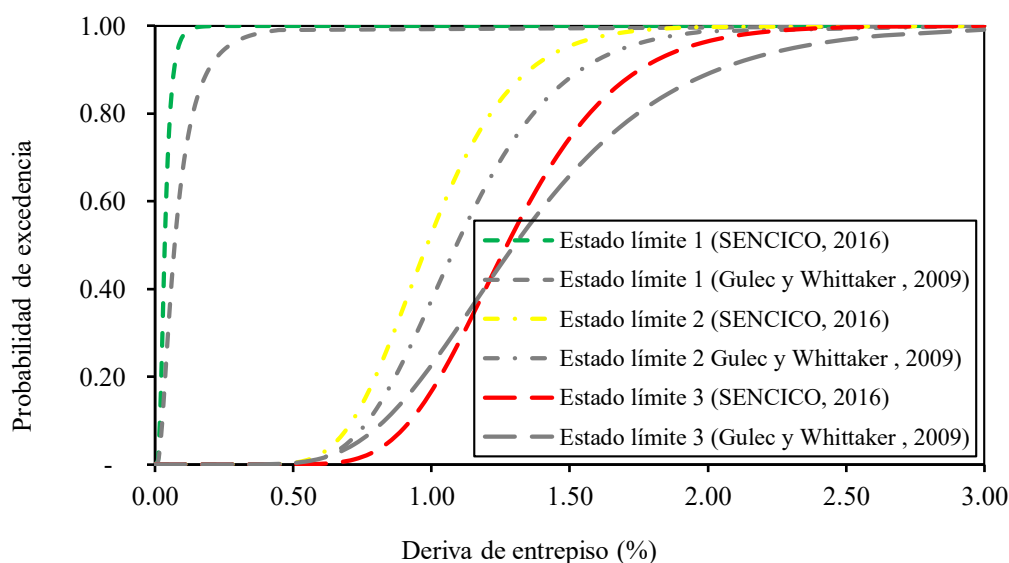


Figura 35. Comparativo de curvas de fragilidad de MDL rectangulares.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

Sin embargo, en las edificaciones los muros tienen diversas formas y no solamente son de formar rectangulares. En la figura 36 se muestra las curvas de fragilidad desarrolladas para muros delgados con ensanche en los bordes y en la figura 37 con muros transversales en los bordes desarrolladas por Gulec y Whittaker (2009).

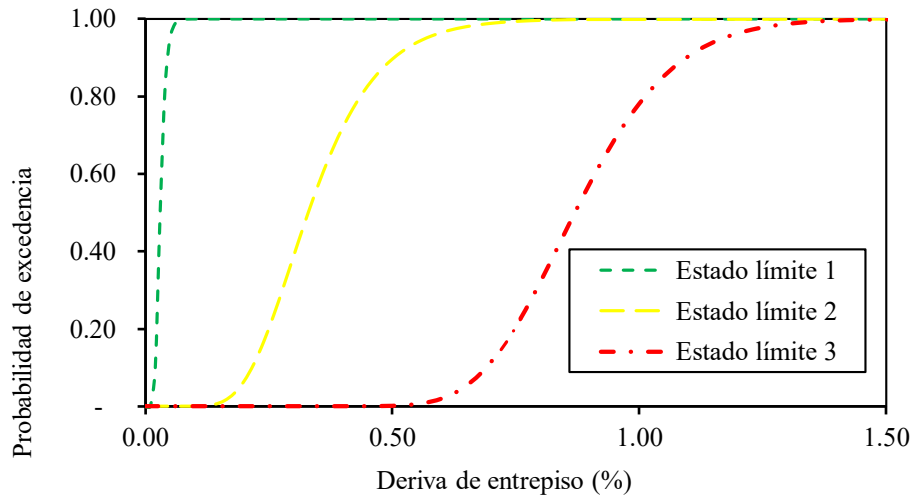


Figura 36. Curvas de fragilidad de muros con ensanche en los bordes.

Tomado de Gulec y Whittaker (2009) *Performance-Based Assessment and Design of Squat Reinforced Concrete Shear Walls*.

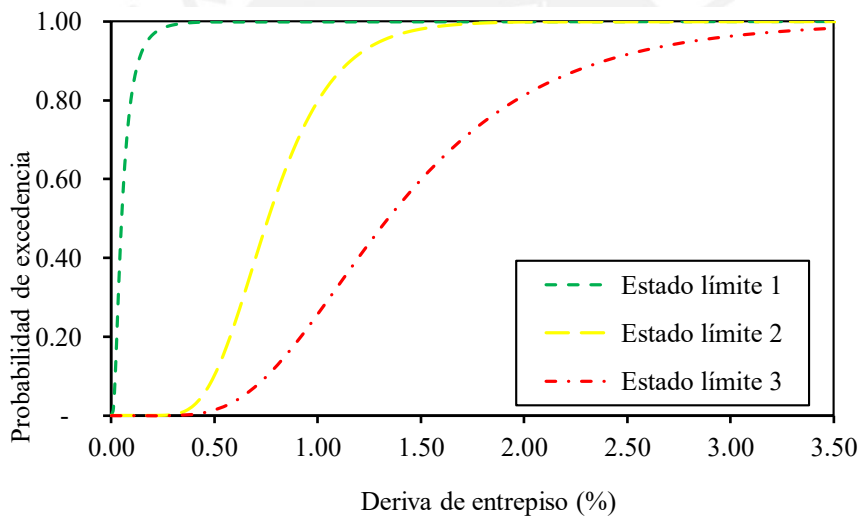


Figura 37. Curvas de fragilidad de muros con muros transversales en los bordes.

Tomado de Gulec y Whittaker (2009) *Performance-Based Assessment and Design of Squat Reinforced Concrete Shear Walls*.

Para asignar las curvas de fragilidad a los muros del prototipo, los muros que tengan hasta el 10% de muros transversales en los bordes se considera muros rectangulares, si son de entre 10% a 50% se considera muro con ensanche en los bordes y si es mayor al 50% se considera muro con muros transversales (Reyes, 2017).

3.2.3.4 Funciones de consecuencias de Muros de Ductilidad Limitada (MDL).

Las curvas de consecuencias representan los costos de los daños que ha sufrido una estructura ante una demanda sísmica determinada. Para el caso de los muros de ductilidad limitada, Reyes (2017) elaboró las curvas de consecuencias que representa los costos de reparación teniendo como base los métodos de reforzamiento realizado por el Laboratorio de Estructuras PUCP (2016), la primera edición del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) y los estudios realizados por Gulec y Whittaker (2009). Los estados de daños definidos por el Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) fueron los siguientes:

a. Sin daño.

No representa daño significativo y metodología de reforzamiento hasta que no alcance el estado límite 1 (Laboratorio de Estructuras PUCP, 2016).

b. Daño leve.

Se considera daño leve cuando el muro se encuentra entre los estados límites 1 y 2. En la figura 38 se muestra el método de reforzamiento que es mediante inyección epóxica para espesores menores a 0.05 mm (Laboratorio de Estructuras PUCP, 2016).



Figura 38. Reparación mediante inyección epóxica.

Tomado de Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Tercera Fase: Ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros.*

c. Daño severo.

Se considera daño severo cuando el muro se encuentra entre los estados límites 2 y 3. En la figura 39 se muestra el método de reforzamiento que es mediante la colocación de malla eletrosoldada a cada lado del muro (Laboratorio de Estructuras PUCP, 2016).



Figura 39. Reforzamiento mediante malla eletrosoldada.

Tomado de Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Tercera Fase: Ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros.*

d. Daño irreparable.

Se considera daño irreparable cuando el muro sobrepasa el estado límites 3. Se plantea la reposición total del muro como se muestra en la figura 40 (Laboratorio de Estructuras PUCP, 2016).



Figura 40. Reposición del muro.

Tomado de Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Tercera Fase: Ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros.*

Las técnicas propuestas de reparación y sus costos relacionados fueron desarrolladas por el Laboratorio de Estructuras PUCP (2016). Se observa que estos costos están relacionados directamente a la reparación de la estructura, vale decir no considera los acabados. Por esta razón la gran diferencia de costos de reparación para los diferentes estados de daños como se observa en la figura 41 (Reyes, 2017).

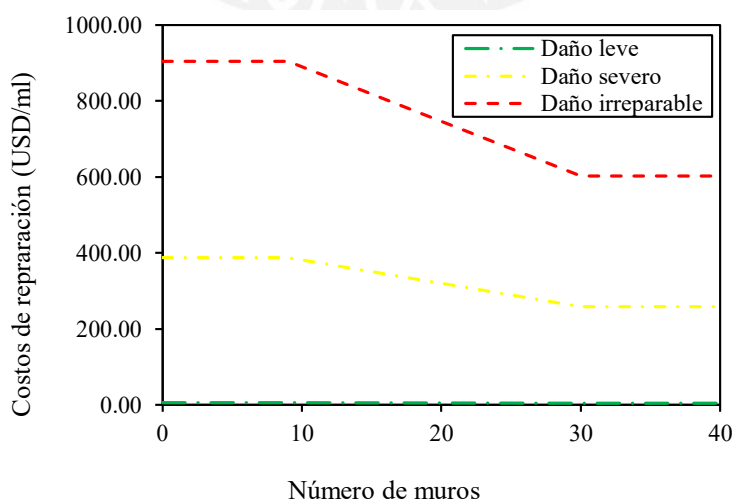


Figura 41. Funciones de consecuencias de costos estructurales de reparación.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

Reyes (2017) adicionó a los costos de reparación de la estructura el costo de los elementos arquitectónicos. Para el caso de muros con daños leves se considera el 50% de los costos de arquitectura y el 100% para muros con daños severo e irreparables. Se ha considera el costo de reposición arquitectónica de 108.78 dólares por metro cuadrado de área tributaria de cada muro basado en los costos de Huertas (2015) que se adicionaron a los costos estructurales de reparación.

3.2.4. Curva de Vulnerabilidad.

Una curva de vulnerabilidad representa la estimación de los daños probables que sufra una estructura en función a los costos necesarios para que sea reestablecida. Para este caso, se estimaron los costos de reparación para diversas intensidades sísmicas.

3.2.3.5 Intensidades sísmicas características en la región.

Muñoz et al. (2013) definieron 4 tipos de sismos para la costa oeste de América del Sur que son las siguientes: sismo frecuente (PGA de 0.20g), sismo ocasional (PGA de 0.25g), sismo raro (PGA de 0.40g) y sismo muy raro (PGA de 0.50g). Con estos valores y de acuerdo a la norma sísmica vigente se elaboraron los espectros de pseudoaceleración considerando una curva ascendente inicial. De la figura 42 se obtuvieron para el prototipo cuyo periodo fundamenta de vibración es de 0.095 segundos las siguientes pseudoaceleraciones:

- Sismo frecuente: 0.53g
- Sismo ocasional: 0.66g
- Sismo raro: 1,05g
- Sismo muy raro; 1.31g

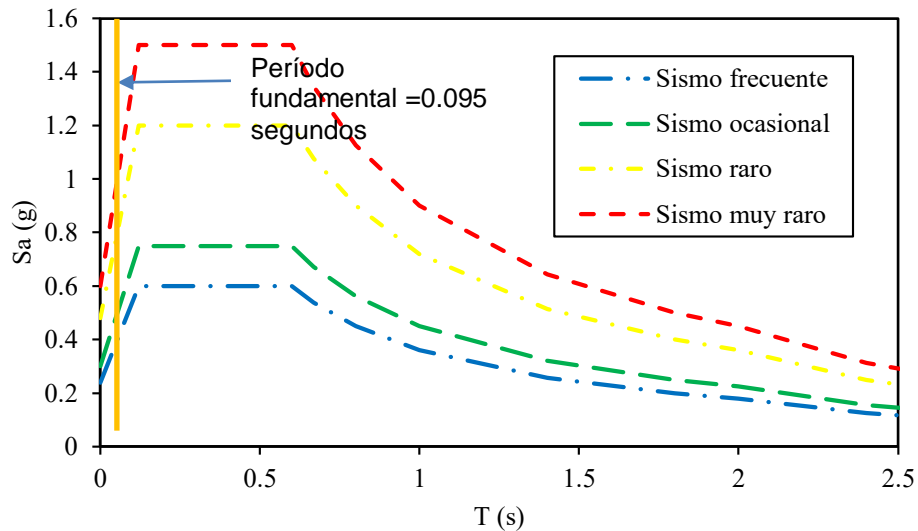


Figura 42: Espectro de los sismos de diseño para el Perú.

3.2.3.6 Simulación del desempeño de la estructura EMDL.

Para determinar las pérdidas del prototipo se ha seguido la metodología del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) y de Reyes (2017) que consiste en estimar la pérdida para 11 registros sísmicos escalados a diversas intensidades sísmicas y a través del software *Performance Asses Applied Technology Council Assessment Calculation Tool* (PACT) del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018) que mediante la simulación de Monte Carlo se obtienen muchos más resultados de pérdidas y así establecer valores más confiables. A continuación, se describe un caso típico de la simulación.

1. El primer paso consiste en determinar si la tipología ha colapsado mediante la curva de fragilidad de colapso para cada intensidad sísmica. De acuerdo a la figura 31 se muestra en la tabla 6 la probabilidad de colapso que para sismos frecuentes y ocasionales es nulo, mientras que para sismos raros y muy raros es muy bajo.

Tabla 6. Probabilidad de colapso de la tipología.

Sismo	Sa (g)	Probabilidad de colapso
Frecuente	0.53	0.0%
Ocasional	0.66	0.0%

Raro	1.05	0.5%
Muy Raro	1.31	1.2%

Por ejemplo, para el caso del registro sísmico de Lima de 1966 escalado para un sismo muy raro. El software PACT (FEMA, 2018) genera un número aleatorio entre 1 y 100. Si el valor resultante es 1 la tipología ha colapsado y el costo relacionado sería el costo de reconstrucción.; asimismo, si el valor se encuentre entre el 2 y el número 100, la estructura no ha colapsado y se procede al siguiente paso (figura 43).

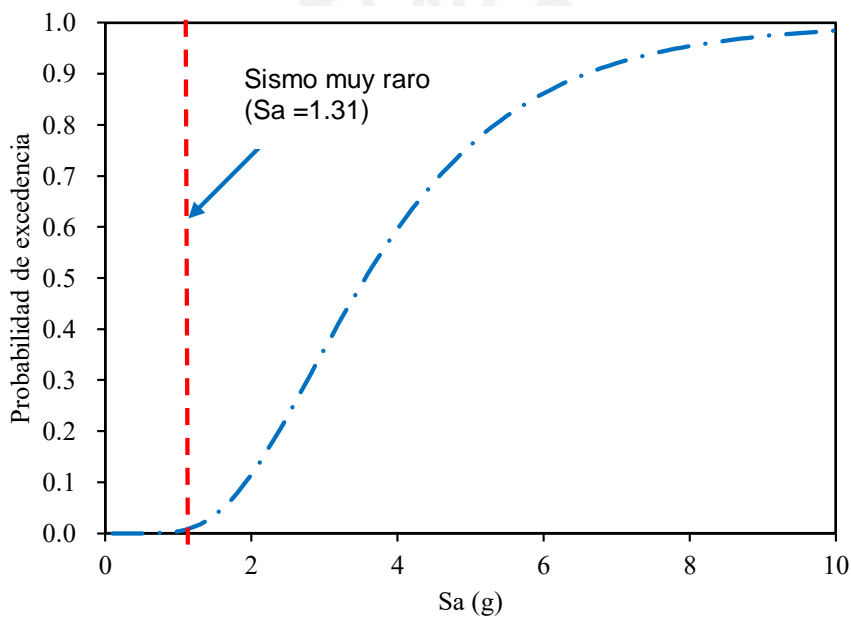


Figura 43. Curva de fragilidad de colapso de la tipología.

2. Cuando la estructura no ha colapsado se procede a estimar los estados de daños de los muros tomando en consideración la deriva de entrepiso. Por ejemplo, para un muro rectangular de 1% de deriva de entrepiso tiene un 48% de probabilidad de encontrarse en daño leve, 34% de daño severo y 18% de daño irreparable. Si el número aleatorio se encuentra entre 1 y 18 el muro se encuentra en daño irreparable, si tiene entre 19 y 52 posee daño severo y si el valor está entre 53 y 100 el muro se encuentra en daño leve como se muestra en la figura 44.

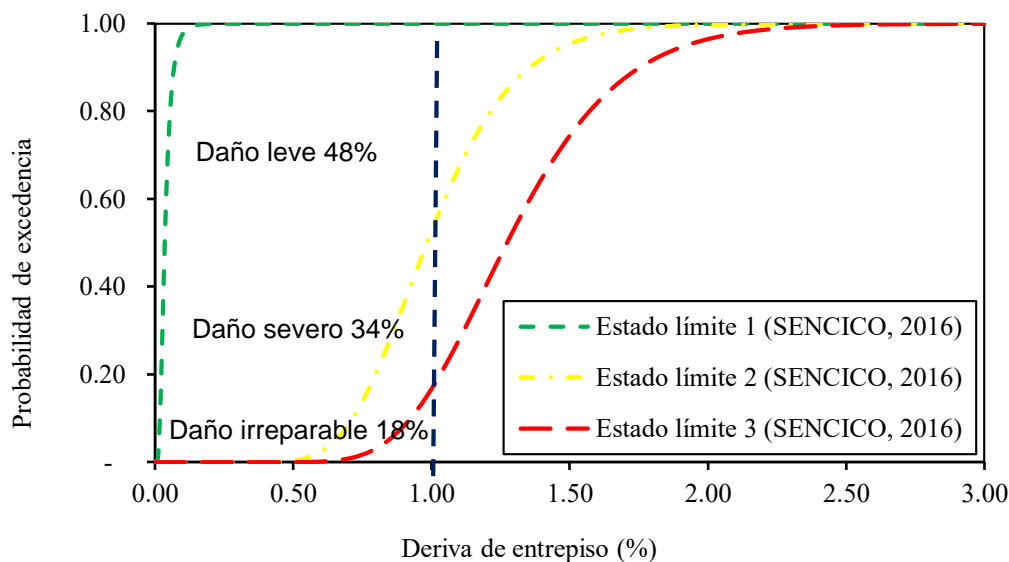


Figura 44. Curva de fragilidad de estados de daño del muro rectangular.

3. Los estados de daños de los muros están relacionados a funciones de consecuencias (figura 45) por lo que con la identificación de los estados de daños de cada muro se obtiene los costos totales de reparación para cada análisis de registros sísmicos. Se realiza el mismo procedimiento para los 11 registros sísmicos escalados en las 4 intensidades sísmicas y a través de la simulación de Monte Carlo se obtienen una mayor gama de valores.

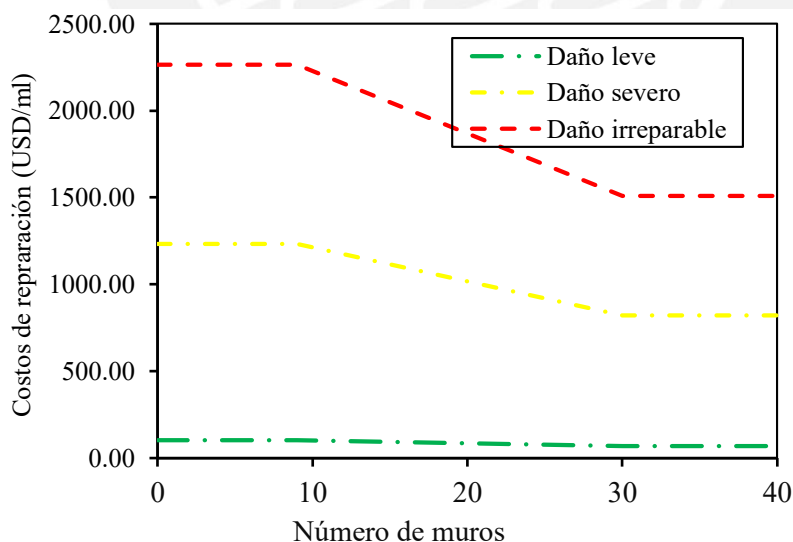


Figura 45. Costos de reparación del muro rectangular.

4. Se estima el costo total de reparación con base a los ratios de costos establecidos por Huertas (2015). En caso la estructura haya colapsado se considera un 20% adicional

por los costos de demolición (FEMA, 2018). Para el ejemplo se obtuvo el costo total de reconstrucción de 114507.7 dólares. En la figura 46 se muestran los costos de reparación con respecto al total de costo de reconstrucción de las simulaciones obtenidos del software *Performance Assessment Calculation Tool* (PACT) del reporte FEMA P-58-1 (FEMA, 2018).

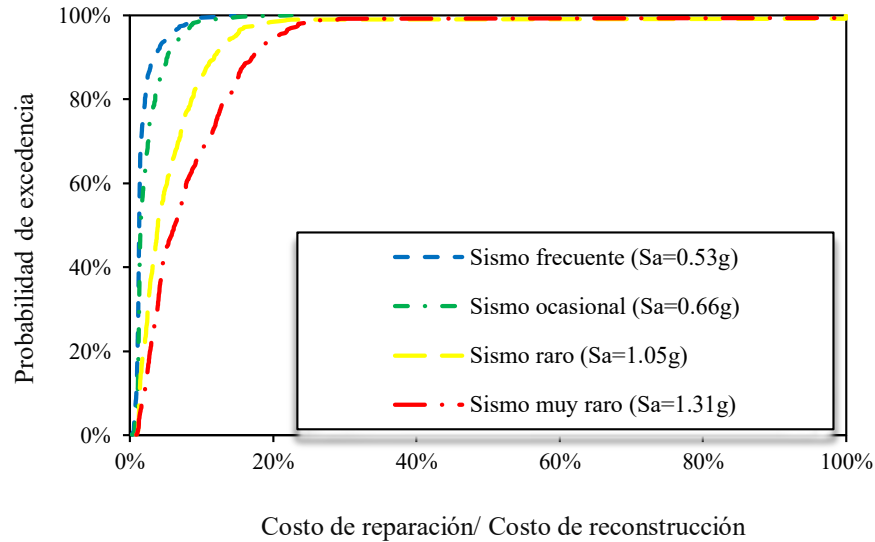


Figura 46. Probabilidad de excedencia de costos de reparación/reconstrucción.

4. Análisis y comparación de resultados

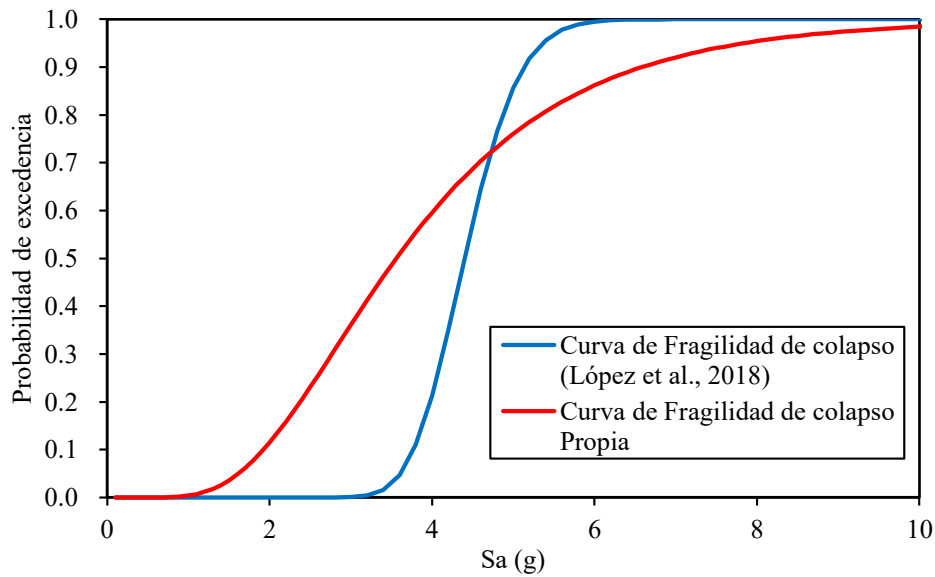


Figura 47. Comparación de la curva de fragilidad de colapso con estudios previos.

En la figura 47 se muestra la comparación de curva de fragilidad de colapso propia con el elaborado por López y Rodríguez (2018) para una edificación de muros de ductilidad limitada de 2 niveles. Se observa que la mediana obtenida 3.56g de la curva obtenida es menor al valor obtenido 4.4g de estudios previos sin embargo posee mayor dispersión.

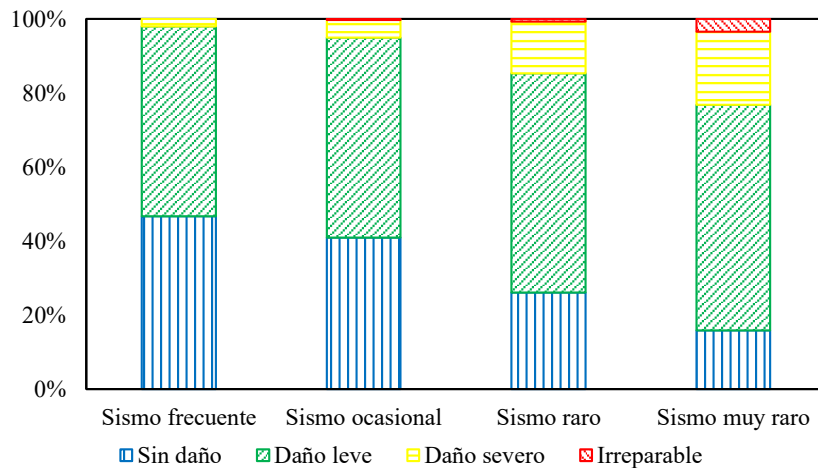


Figura 48. Estado de daños de muros para tipología de 2 pisos.

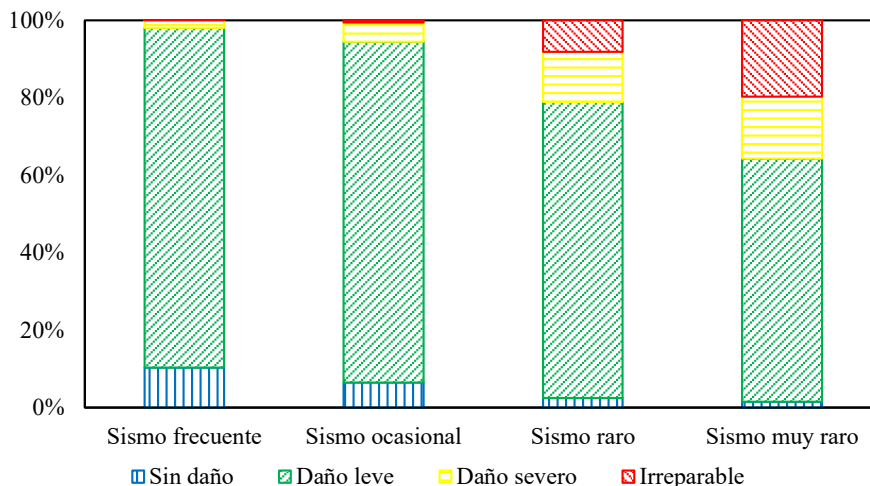


Figura 49. Estado de daños de muros para tipología de 5 pisos.

Tomado de Reyes (2017) *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de Edificios de Muros de Ductilidad Limitada (EMDL) en la costa central del Perú.*

En la figura 48 se observan el porcentaje de los estados de daños de los muros para diversas intensidades sísmicas. Se visualiza el predominio de muros sin daños y daños leves para el prototipo de 2 niveles en comparación de la tipología de 5 niveles (figura 49) desarrollada por Reyes (2017) en la que se observa mayores niveles de daños.

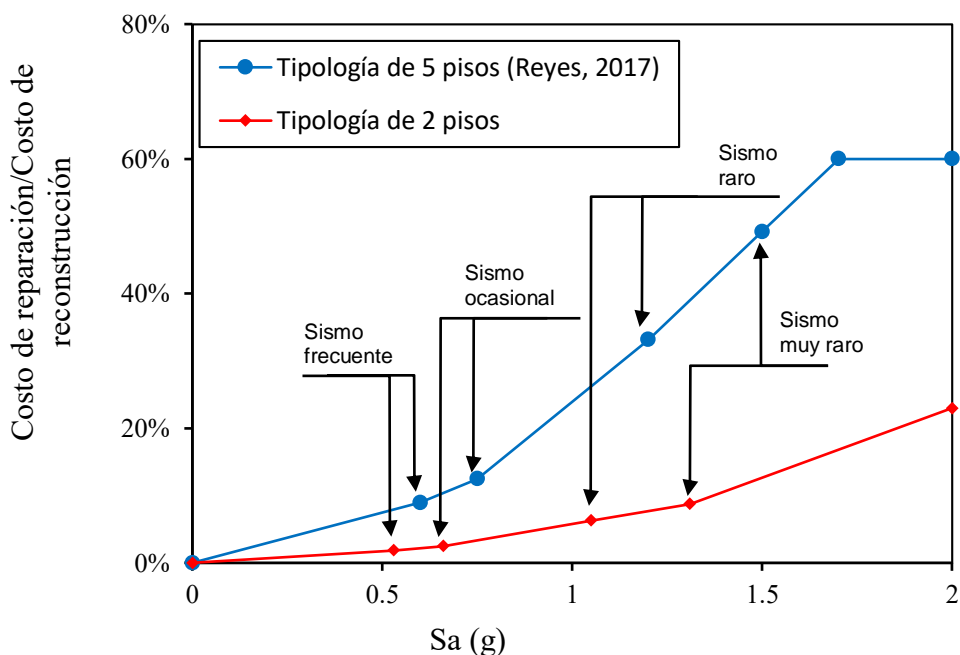


Figura 50. Comparación de curva de vulnerabilidad con estudios previos.

En la figura 50 se muestra la media de los costos de reparación/reconstrucción de la tipología desarrollada de 2 pisos; asimismo, se observa la comparación con la tipología de 5 pisos desarrollada por Reyes (2017). Se observa menor cantidad de pérdidas para tipología de 2 pisos en comparación de la tipología de 5 pisos y mínima probabilidad de colapso.



5. Conclusiones y Recomendaciones

- El prototipo de muros de ductilidad limitada de 2 pisos posee un adecuado comportamiento estructural debido a que solo se tiene el 1% de probabilidad de colapso de la estructura para sismos raros y muy raros.
- El prototipo presenta el predominio de muros sin daños o daños leves para sismos raros y muy raros con escasa presencia de muros con daños severos e irreparables por lo que los costos de reparación no sobrepasan el 20% de los costos de reconstrucción.
- Las técnicas de reparación desarrolladas por el Laboratorio de Estructuras PUCP (2016) son económicamente viables de acuerdo a los resultados obtenidos.
- Las investigaciones experimentales desarrolladas en nuestro país para la obtención de curvas de fragilidad y funciones de consecuencias de muros de ductilidad limitada solo han sido desarrolladas para muros rectangulares sin ensanches en los bordes ni muros ortogonales que son más comunes en las edificaciones.

5. Referencias

- American Society of Civil Engineers (2000). *FEMA 356 Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Virginia, USA.
- Chopra, A. (2014). *Dinámica de estructuras* (2da. Edición). Ciudad de México, México: Pearson Education.
- Crowley, H., Pinho, R., Bommer, J. J., Bird, J. F. (2006). *Development of a displacement-based method for earthquake loss assessment*. Pavia, Italia: IUSS Press.
- Computers and Structures Inc. (2021). *Perform components and elements for Perform-3D and perform-collapse*. (Versión 8). California, USA.
- Corporación Suyu (2013). *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Primera Fase: Edificaciones típicas de vivienda popular unifamiliar y multifamiliar*. Lima, Perú
- Recuperado de <https://drive.google.com/file/d/121HlehDU-ZP4mEKD2ahOv7lJGIFZm6lC/view>
- Delgado, R., Peña, C. (2006) *Edificios Peruanos con muros de concreto de ductilidad limitada*. Tesis de grado. Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
- Federal Emergency Management Agency (1985). *ATC-13 Earthquake Damage Evaluation Data for California*. Washington D. C., USA.
- Federal Emergency Management Agency (2009). *ATC-63 (FEMA P-695) Quantification of Building Seismic Performance Factors*. Washington D. C., USA.
- Federal Emergency Management Agency (2018). *FEMA P-58-1 Seismic Performance Assessment of Buildings Volume 1 – Methodology*. (Second Edition). Washington D. C., USA.

- Gálvez, A. (2008) *Propuesta del factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales en concreto armado con muros reforzados por barras dúctiles y mallas electro soldadas*. Lima, Perú.
- Gálvez A, (2010). *Viviendas económicas de concreto con mallas electrosoldadas*. Lima, Perú: presentación al concurso Premio Graña y Montero.
- Gérin, M., Adebar, P. (2004). *Accounting for shear in seismic analysis of concrete structure*. 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada, Paper No. 1747.
- González, H (2010). *Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón: Aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú*. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politécnica de Cataluña,
- Gulec, C. K., Whittaker A. S. (2009). *Performance-Based Assessment and Design of Squat Reinforced Concrete Shear Walls*. Technical Report MCEER-09-001. University at Buffalo
- Huerto, P. (2015). *Evaluación de la viabilidad de un proyecto inmobiliario de vivienda económica en el distrito de Carabayllo*. Tesis de Maestría. Escuela de Posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Lopez S., Rodríguez C. (2018). *Construcción de curvas de fragilidad para viviendas unifamiliares de muros de Ductilidad Limitada*. Tesis de Maestría. Escuela de Posgrado, Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Medina, G. (2005); *Estudio Del Comportamiento Experimental A Escala Natural De Muros Y Modulo De Concreto Reforzados Con Malla Electrosoldada*. Tesis de grado. Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.

Ministerio de Vivienda, Construcción y saneamiento (2006). *Modifican la norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones. Resolución Ministerial N°011-2006-Vivienda*

Ministerio de Vivienda, Construcción y saneamiento (2018). *Modifican la norma Técnica E.030 Diseño sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones. Resolución Ministerial N°355-2018-Vivienda*

Muñoz, A., Tinman, M., Quiun D. (2013). *Riesgo sísmico de edificaciones peruanos*. Prisma Ingenieros. Lima, Perú.

Paulay y Priestley (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Building*. John Wiley and Sons. USA.

Laboratorio de Estructuras - Pontificia Universidad Católica del Perú (2004). *Comportamiento sísmico de placas de concreto reforzadas con mallas electrosoldadas - Informe final*. Informe INF-LE-167-04. Lima, Perú.

Laboratorio de Estructuras - Pontificia Universidad Católica del Perú (2016). *Estimación de pérdidas en vivienda popular ante la ocurrencia de un sismo severo. Tercera Fase: Ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros*. Lima, Perú.

Recuperado de

https://drive.google.com/file/d/1cgGCMntaaVqB_xhb6hVZH4hdrS3cOGa7/view

Reyes C. (2017). *Estudio analítico de vulnerabilidad sísmica de edificios de muros de ductilidad limitada (EMDL) en la costa central del Perú*. Tesis de Maestría. Escuela de Posgrado. Pontificia Universidad Católica del Perú.

Rossetto T. y Elnashai A. (2003). *Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data*. Engineering Structures 25:1241-1263.

Vamvatsikos, D. C., Cornell, A. (2002). *Incremental dynamic analysis*. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2002. 31(3): p. 491-514



ANEXO: Respuesta estructural del modelo por dirección y nivel

Tabla 7. Respuesta estructural de deriva de entrepiso para sismos frecuentes ($S_a=0.53g$).

Sismo frecuente	Nivel	Lima 1966	Huaraz 1970	Lima 1974	Zarate 1974	La Molina 1974	Arequipa 2001	Pisco 2007	Iquique 2014	Tocopilla 2007	Punitaqui 1997	Antofagasta 1995
Dirección x	1	0.02%	0.06%	0.06%	0.11%	0.13%	0.05%	0.05%	0.03%	0.04%	0.11%	0.04%
	2	0.05%	0.12%	0.12%	0.23%	0.24%	0.09%	0.10%	0.07%	0.09%	0.22%	0.08%
Dirección y	1	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.02%	0.01%	0.01%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%
	2	0.01%	0.01%	0.02%	0.03%	0.03%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.03%	0.01%

Tabla 8. Respuesta estructural de deriva de entrepiso para sismos ocasionales ($S_a=0.66g$).

Sismo ocasional	Nivel	Lima 1966	Huaraz 1970	Lima 1974	Zarate 1974	La Molina 1974	Arequipa 2001	Pisco 2007	Iquique 2014	Tocopilla 2007	Punitaqui 1997	Antofagasta 1995
Dirección x	1	0.03%	0.07%	0.08%	0.13%	0.17%	0.07%	0.08%	0.05%	0.06%	0.16%	0.05%
	2	0.05%	0.13%	0.15%	0.26%	0.29%	0.13%	0.15%	0.09%	0.11%	0.31%	0.11%
Dirección y	1	0.00%	0.01%	0.01%	0.03%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%
	2	0.01%	0.02%	0.02%	0.04%	0.03%	0.02%	0.02%	0.01%	0.02%	0.04%	0.02%

Tabla 9. Respuesta estructural de deriva de entrepiso para sismos raros ($S_a=1.05g$).

Sismo raro	Nivel	Lima 1966	Huaraz 1970	Lima 1974	Zarate 1974	La Molina 1974	Arequipa 2001	Pisco 2007	Iquique 2014	Tocopilla 2007	Punitaqui 1997	Antofagasta 1995
Dirección x	1	0.07%	0.09%	0.15%	0.19%	0.35%	0.14%	0.13%	0.08%	0.08%	0.25%	0.09%
	2	0.13%	0.18%	0.30%	0.38%	0.56%	0.27%	0.26%	0.15%	0.16%	0.48%	0.18%
Dirección y	1	0.01%	0.01%	0.02%	0.07%	0.04%	0.02%	0.01%	0.01%	0.01%	0.03%	0.01%
	2	0.02%	0.02%	0.03%	0.05%	0.06%	0.03%	0.03%	0.02%	0.02%	0.05%	0.02%

Tabla 10. Respuesta estructural de deriva de entrepiso para sismos muy raros ($S_a=1.31g$).

Sismo muy raro	Nivel	Lima 1966	Huaraz 1970	Lima 1974	Zarate 1974	La Molina 1974	Arequipa 2001	Pisco 2007	Iquique 2014	Tocopilla 2007	Punitaqui 1997	Antofagasta 1995
Dirección x	1	0.10%	0.12%	0.22%	0.24%	0.62%	0.17%	0.19%	0.12%	0.12%	0.32%	0.12%
	2	0.17%	0.22%	0.39%	0.45%	0.94%	0.32%	0.34%	0.23%	0.22%	0.58%	0.22%
Dirección y	1	0.01%	0.02%	0.02%	0.14%	0.06%	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%	0.03%	0.01%
	2	0.02%	0.03%	0.04%	0.08%	0.11%	0.04%	0.03%	0.03%	0.03%	0.06%	0.03%