



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE LA FRAGILIDAD SÍSMICA EN EDIFICACIONES CON MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA REFORZADOS CON MALLA DE ACERO DÚCTIL Y MALLA ELECTROSOLDADA, LIMA, 2025

Línea de investigación:
**Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y
geotecnia**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autora

Caro Morales, Nátali Bianca

Asesor

Quintanilla Huayta, Dario

ORCID: 0000-0001-7555-9069

Jurado

Bendezú Romero, Lenin Miguel

Yupari Silva, Emilio Gustavo

Ayquipa Quispe, Evelyn Estefany

Lima - Perú

2026

EVALUACIÓN DE LA FRAGILIDAD SÍSMICA EN EDIFICACIONES CON MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA REFORZADOS CON MALLA DE ACERO DÚCTIL Y MALLA ELECTROSOLDADA, LIMA, 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

14%	12%	7%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4%
2	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	www.slideshare.net Fuente de Internet	1%
4	Ruiz Esquivel, Jose Oscar. "Estimacion de perdidas por sismos mediante funciones de fragilidad analiticas: caso de dos pabellones universitarios del Cusco.", Pontificia Universidad Catolica del Peru - CENTRUM Catolica (Peru), 2020 Publicación	1%
5	repositorio.upt.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
7	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
8	vsip.info Fuente de Internet	<1%
9	mediaserver.xpp.cesca.cat Fuente de Internet	<1%



FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

**EVALUACIÓN DE LA FRAGILIDAD SÍSMICA EN EDIFICACIONES CON
MUROS DE DUCTILIDAD LIMITADA REFORZADOS CON MALLA DE ACERO
DÚCTIL Y MALLA ELECTROSOLDADA, LIMA, 2025**

Línea de Investigación:

Desarrollo urbano-rural, catastro, prevención de riesgos, hidráulica y geotecnia

Tesis para optar por el Título Profesional de Ingeniero Civil

Autora:

Caro Morales, Nátali Bianca

Asesor:

Quintanilla Huayta, Dario

ORCID: 0000-0001-7555-9069

Jurado:

Bendezú Romero, Lenin Miguel

Yupari Silva, Emilio Gustavo

Ayquipa Quispe, Evelyn Estefany

Lima – Perú

2026

Dedicatoria

A mi madre,

María Esperanza Morales Landeo.

Agradecimientos

A mi familia, por apoyar siempre mis decisiones y alentarme a seguir avanzando.

A mi asesor, por su valiosa orientación para la culminación de este trabajo de investigación.

ÍNDICE

RESUMEN	11
ABSTRACT.....	12
I. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Descripción y formulación del problema	13
1.1.1. <i>Problema general</i>	14
1.1.2. <i>Problemas específicos</i>	14
1.2. Antecedentes.....	14
1.2.1. <i>Uso de mallas electrosoldadas y mallas de acero dúctil como refuerzo estructural en MDL</i>	14
1.2.2. <i>Metodologías de construcción de curvas de fragilidad: enfoque estático y dinámico</i>	19
1.3. Objetivos.....	23
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	23
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	23
1.4. Justificación	24
1.4.1. <i>Práctica</i>	24
1.4.2. <i>Social</i>	24
1.5. Hipótesis	25
1.5.1. <i>Hipótesis general</i>	25

1.5.2.	<i>Hipótesis específicas</i>	25
II.	MARCO TEÓRICO	27
2.1.	Bases teóricas sobre el tema de investigación	27
2.1.1.	<i>Sistema de muros de ductilidad limitada</i>	27
2.1.2.	<i>Ingeniería sísmica basada en desempeño</i>	29
2.1.3.	<i>Análisis estático no lineal</i>	30
2.1.4.	<i>Evaluación probabilística de la fragilidad sísmica</i>	33
III.	MÉTODO	36
3.1.	Tipo de investigación.....	36
3.2.	Ámbito temporal y espacial	36
3.3.	Variables	36
3.3.1.	<i>Variable independiente</i>	36
3.3.2.	<i>Variable dependiente</i>	37
3.4.	Población y muestra.....	37
3.5.	Instrumentos	38
3.6.	Procedimientos	39
3.6.1.	<i>Selección del caso base y planteamiento de casos de estudio</i>	40
3.6.2.	<i>Correlación numérico - experimental de muros de concreto</i>	42
3.6.3.	<i>Modelado de la no linealidad</i>	45
3.6.4.	<i>Definición de estados de daño y construcción de curvas de fragilidad</i>	49
3.6.5.	<i>Probabilidades discretas de daño</i>	51

3.7.	Análisis de datos	52
3.8.	Consideraciones éticas.....	52
IV.	RESULTADOS	54
4.1.	Capacidad de deformación y definición de estados de daño	54
4.2.	Evaluación del punto de desempeño y derivas máximas.....	55
4.3.	Curvas de fragilidad.....	58
4.3.1.	<i>Dirección longitudinal XX</i>	58
4.3.2.	<i>Dirección transversal YY+</i>	63
4.3.3.	<i>Dirección transversal YY-</i>	68
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	76
5.1.	Comparación de capacidad de deformación y definición de estados de daño.....	76
5.2.	Respuesta sísmica (derivadas).....	77
5.3.	Análisis comparativo de la fragilidad sísmica	77
VI.	CONCLUSIONES.....	80
VII.	RECOMENDACIONES.....	82
VIII.	REFERENCIAS	83
IX.	ANEXOS	89
	Anexo A . MATRIZ DE CONSISTENCIA	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis comparativo de las propiedades mecánicas entre la malla electrosoldada y el acero dúctil	15
Tabla 2. Parámetros geométricos del edificio.....	40
Tabla 3. Definición de estados de daño y fallas observadas para muros de ductilidad limitada	50
Tabla 4. Parámetros estadísticos de las curvas de fragilidad del escenario MDL-EW	54
Tabla 5. Parámetros estadísticos de las curvas de fragilidad del escenario MDL-DB	54
Tabla 6. Respuesta estructural en el punto de desempeño para distintos niveles de amenaza sísmica (Escenario MDL-EW).....	55
Tabla 7. Respuesta estructural en el punto de desempeño para distintos niveles de amenaza sísmica (Escenario MDL-DB)	56
Tabla 8. Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección XX	59
Tabla 9. Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección XX	59
Tabla 10. Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección XX	62
Tabla 11. Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección XX.....	62
Tabla 12. Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección YY+	64
Tabla 13. Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-	

EW en la dirección YY+.....	64
Tabla 14. Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección YY+	66
Tabla 15. Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección YY+	67
Tabla 16. Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección YY-	69
Tabla 17. Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección YY-.....	69
Tabla 18. Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección YY-	71
Tabla 19. Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección YY-.....	71
Tabla 20. Resumen de resultados.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Diagrama de esfuerzo vs deformación unitaria para diversos diámetros de barras corrugadas y mallas electrosoldadas.....	16
Figura 2.	Curvas envolventes de respuesta cortante en la base (V) vs desplazamiento lateral (D1)	17
Figura 3.	Distribución de probabilidad de daño sísmico en función del PGA (a) acero corrugado (b) malla electrosoldada.....	18
Figura 4.	Comparación entre el índice de daño obtenido mediante el método estático (pushover) y el método dinámico (IDA).....	21
Figura 5.	Comparación de curvas de fragilidad generadas mediante metodologías estáticas y dinámicas para tres estados de límite de daño	22
Figura 6.	Configuración convencional de refuerzo en muros de ductilidad limitada	28
Figura 7.	Procedimiento del análisis estático pushover	31
Figura 8.	Representación bilineal de la curva de capacidad.....	32
Figura 9.	Método del espectro de capacidad (MEC).....	33
Figura 10.	Representación gráfica de curvas de fragilidad	35
Figura 11.	Planta típica del edificio.....	41
Figura 12.	Espécimen MQE257EP-01	42
Figura 13.	Curvas histeréticas experimental vs. numérica del espécimen MQE257EP-01	43
Figura 14.	Espécimen MDL-07.....	44
Figura 15.	Curvas histeréticas experimental vs. numérica del espécimen MDL-07	45
Figura 16.	(a) Ejemplo de control de secciones a lo largo del elemento (b) discretización	

de la sección tipo fibra	46
Figura 17. Relación esfuerzo-deformación del concreto no confinado en compresión planteado por Hognestad.....	47
Figura 18. Relación esfuerzo-deformación del concreto en tensión planteado por Belarbi y Hsu. 48	
Figura 19. Relación esfuerzo-deformación para el acero planteado por Park y Paulay....	49
Figura 20. Curvas de fragilidad del escenario MDL-EW en la dirección XX	58
Figura 21. Curvas de fragilidad del escenario MDL-DB en la dirección XX.....	61
Figura 22. Curvas de fragilidad del escenario MDL-EW en la dirección YY+	63
Figura 23. Curvas de fragilidad del escenario MDL-DB en la dirección YY+	66
Figura 24. Curvas de fragilidad del escenario MDL-EW en la dirección YY-.....	68
Figura 25. Curvas de fragilidad del escenario MDL-DB en la dirección YY-	70

RESUMEN

La presente investigación evalúa la fragilidad sísmica de edificaciones con muros de ductilidad limitada (MDL) en la ciudad de Lima, realizando un análisis comparativo entre el uso de refuerzo con malla electrosoldada y malla de acero dúctil. La metodología empleada fue de tipo aplicada con enfoque cuantitativo, analizando una edificación multifamiliar típica de cinco pisos sobre un suelo blando. Se desarrollaron modelos numéricos validados con evidencia experimental previa, los cuales fueron sometidos a un análisis estático no lineal para determinar sus curvas de capacidad y puntos de desempeño para cada dirección y para distintos niveles de amenaza sísmica. Posteriormente, se construyeron las curvas de fragilidad siguiendo la metodología probabilística de HAZUS-MH MR4 para cuatro estados de daño. Los resultados demostraron que, si bien ambos sistemas presentan una rigidez elástica inicial similar, existen diferencias significativas en su comportamiento inelástico. El sistema con malla electrosoldada presentó umbrales de daño más restrictivos, definiendo un colapso con una deriva de 5‰, mientras que el sistema con malla de acero dúctil extendió este límite hasta 7‰. Asimismo, frente a un sismo muy raro, la probabilidad de colapso para la malla electrosoldada alcanzó el 9% en la dirección más crítica, frente a solo un 2% para el acero dúctil. Se concluye que el refuerzo con malla de acero dúctil reduce drásticamente la fragilidad sísmica y otorga mayor confiabilidad estructural, validando las restricciones normativas actuales sobre el uso de mallas electrosoldadas en zonas de alta sismicidad en el Perú.

Palabras clave: estructuras de concreto armado, análisis estructural, seguridad estructural.

ABSTRACT

This research evaluates the seismic fragility of buildings with limited ductility walls in the city of Lima, Peru, by conducting a comparative analysis between the use of welded wire mesh reinforcement and ductile steel mesh reinforcement. The methodology employed was applied with a quantitative approach, analysing a typical five-story multi-family building on soft soil. Numerical models validated with prior experimental data were developed and subjected to nonlinear static analysis to determine their capacity curves and performance points for each direction and for different levels of seismic hazard. Subsequently, fragility curves were constructed following the probabilistic HAZUS-MH MR4 methodology for four damage states. The results demonstrated that, while both systems exhibit similar initial elastic stiffness, there are significant differences in their inelastic behaviour. The system with welded wire mesh exhibited more restrictive damage thresholds, defining collapse with a drift of 5%, while the system with ductile steel mesh extended this limit to 7%. Furthermore, in the event of a very rare earthquake, the probability of collapse for the welded wire mesh reached 9% in the most critical direction, compared to only 2% for ductile steel. It is concluded that reinforcement with ductile steel mesh drastically reduces seismic fragility and provides greater structural reliability, validating current regulatory restrictions on the use of welded wire mesh in areas of high seismicity in Peru.

Keywords: reinforced concrete structures, structural analysis, structural safety.

I. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo establece los fundamentos de la investigación situando el estudio en el contexto de la fragilidad sísmica de las viviendas en Lima. A continuación, se detalla la problemática respecto al desempeño de los muros de ductilidad limitada, se exponen los antecedentes que sustentan el análisis y se definen los objetivos y la justificación que motivan la comparación entre el uso de acero dúctil y malla electrosoldada.

1.1. Descripción y formulación del problema

En el departamento de Lima, caracterizado por su alta actividad sísmica debido a su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, es fundamental evaluar la fragilidad sísmica de las edificaciones para garantizar la seguridad de sus habitantes y minimizar las pérdidas materiales y humanas. Debido a la alta demanda habitacional, las edificaciones con muros de ductilidad limitada (MDL) constituyen una solución estructural comúnmente utilizada en el sector construcción debido a su bajo costo y rapidez constructiva (Yáñez, 2006).

Sin embargo, el desempeño sísmico de este sistema presenta limitaciones, especialmente al variar el tipo de refuerzo. El comportamiento de la malla de acero dúctil frente a la malla electrosoldada aún no ha sido suficientemente validado en escenarios de alta demanda sísmica (San Bartolomé et al., 2003).

La problemática principal radica en la escasez de estudios específicos que evalúen la fragilidad sísmica de estas edificaciones, considerando las probabilidades de daño estructural frente a distintos niveles de intensidad sísmica. Aunque existen investigaciones sobre el comportamiento sísmico de edificaciones con MDL (Arciniegas, 2020; Gonzales y López-Almansa, 2012; Haindl, 2014; Lopez y Rodriguez, 2018; Rengel, 2016), estas carecen de un enfoque probabilístico mediante curvas de fragilidad, herramientas esenciales para estimar probabilísticamente el nivel de daño esperado y para realizar comparaciones detalladas entre los refuerzos con malla de acero dúctil y malla electrosoldada.

Por consiguiente, existe la necesidad técnica de realizar un estudio comparativo que cuantifique la fragilidad sísmica entre edificaciones reforzadas con malla electrosoldada y aquellas con malla de acero dúctil. Este análisis no solo busca llenar el vacío de conocimiento existente, sino también generar conocimiento técnico que contribuya al diseño sismorresistente de futuras construcciones y reducir el riesgo sísmico en la ciudad de Lima.

1.1.1. Problema general

¿De qué manera influye el uso de malla de acero dúctil comparado con la malla electrosoldada en la evaluación de la fragilidad sísmica de edificaciones con muros de ductilidad limitada en la ciudad de Lima?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son los estados límite de daño aplicables a edificaciones de muros de ductilidad limitada que permitan correlacionar adecuadamente el parámetro de demanda ingenieril con la evidencia experimental y sísmica existente?
- ¿En qué medida varían las curvas de fragilidad sísmica para el sistema con malla de acero dúctil en comparación con la malla electrosoldada, en función de la deriva de entrepiso?
- ¿Cuál de los dos sistemas de refuerzo, malla de acero dúctil o malla electrosoldada, presenta menor fragilidad y mayor confiabilidad estructural frente a distintos niveles de intensidad sísmica?

1.2. Antecedentes

1.2.1. Uso de mallas electrosoldadas y mallas de acero dúctil como refuerzo estructural en MDL

La principal inquietud respecto a las edificaciones de MDL radica en la idoneidad del uso de la malla electrosoldada frente al acero dúctil. Esta preocupación deriva de sus diferencias en propiedades mecánicas (Tabla 1), particularmente en su capacidad de

deformación como se puede observar en la Figura 1.

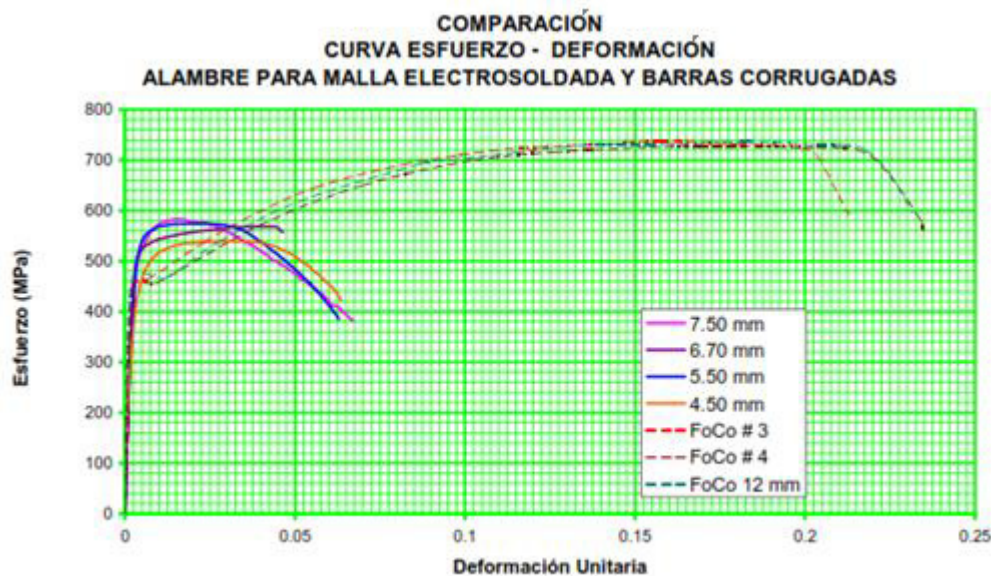
Tabla 1

Análisis comparativo de las propiedades mecánicas entre la malla electrosoldada y el acero dúctil

Propiedad	Malla electrosoldada	Acero dúctil
Resistencia a la fluencia (f_y)	Generalmente alta, variando entre 500MPa a 650MPa (Arroyo et al., 2021; Carrillo et al., 2019; Carrillo y Alcocer, 2012)	Típicamente 420MPa. Grado 60 (Arroyo et al., 2021; Carrillo y Alcocer, 2012)
Deformación última (ϵ_u)	Muy limitada (Arroyo et al., 2021; Carrillo y Alcocer, 2012)	Alta (Arroyo et al., 2021; Carrillo y Alcocer, 2012)
Comportamiento	Carece de una plataforma de fluencia definida y presenta una capacidad de endurecimiento por deformación despreciable. (Carrillo et al., 2019)	Exhibe una plataforma de fluencia marcada seguida de una zona de endurecimiento por deformación significativa. Posee gran capacidad de disipación de energía mediante deformaciones inelásticas antes de la falla. (L. G. Quiroz y Maruyama, 2014)

Figura 1

Diagrama de esfuerzo vs deformación unitaria para diversos diámetros de barras corrugadas y mallas electrosoldadas



Nota. Tomado de “Propuesta del factor de reducción de fuerza sísmica para sistemas estructurales en concreto armado con muros reforzados por barras dúctiles y mallas electrosoldadas”, por Gálvez , 2008.

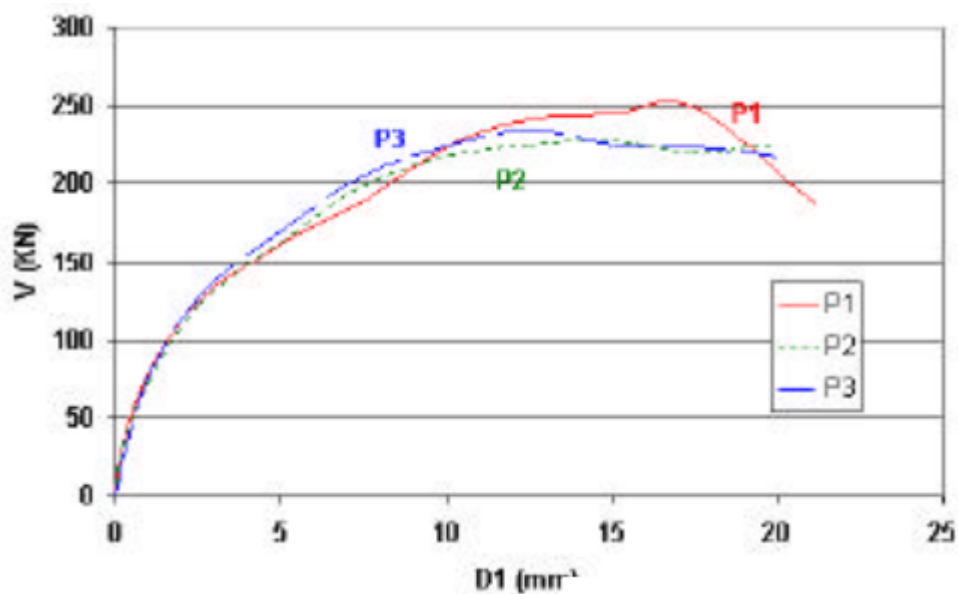
Es por ello que el desarrollo de la investigación experimental a escala natural de muros de ductilidad limitada ha sido crucial para comprender el desempeño de ambos tipos de mallas ante fuerzas externas. Estos estudios fueron desarrollados en laboratorios peruanos, colombianos y mexicanos.

En el contexto nacional, San Bartolomé et al. (2003), ofrecen evidencia empírica determinante sobre estas diferencias. Al someter a cargas cíclicas muros reforzados con mallas electrosoldadas (P1) frente a especímenes con varillas de acero dúctil (P2), se reveló una distinción en el comportamiento inelástico. Si bien el estudio evidenció que ambos sistemas presentaron una respuesta similar hasta alcanzar el desplazamiento de 12.5mm, el muro P1 experimentó mayor degradación de resistencia en comparación con el muro P2 (Figura 2). Este

deterioro fue a causa de la rotura de la malla, lo que confirmó físicamente la ductilidad reducida del material. Estos resultados demostraron la incapacidad de la malla para soportar deformaciones sin romperse o degradar su resistencia por lo que se delimitó su deriva límite a 0.005 y estableció el factor de reducción sísmica en $R=3$.

Figura 2

Curvas envolventes de respuesta cortante en la base (V) vs desplazamiento lateral ($D1$)

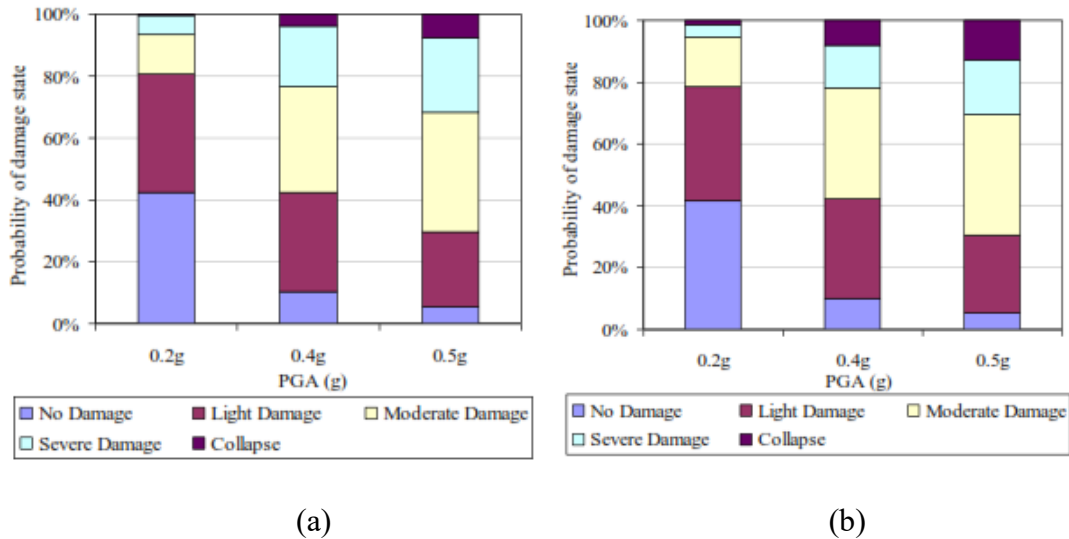


Nota. Tomado de “Comportamiento sísmico de placas de concreto reforzadas con mallas electrosoldadas”, por San Bartolomé et al. , 2003. SENCICO- PUCP, Pontificia Universidad Católica Del Perú (PUCP). Lima.

De manera similar, Quiroz L. y Maruyama Y. (2014) a través de un estudio analítico basado en pruebas experimentales realizados por Zavala (2004), determinaron que el muro reforzado con malla electrosoldada (Figura 3(b)) daba probabilidades de daño similares al muro reforzado con acero convencional (Figura 3(a)), ambos manteniendo cuantías similares (aproximadamente 0.25%). En niveles de amenaza baja a moderada, ambos refuerzos presentaron un desempeño estadísticamente similar, aunque para amenazas severas existió un incremento del 60% de riesgo relativo al colapso (de 7.9% a 12.7%) a favor del uso de los muros reforzados con acero dúctil.

Figura 3

Distribución de probabilidad de daño sísmico en función del PGA (a) acero corrugado (b) malla electrosoldada



Nota. Tomado de “*Effect of electro-welded wire mesh on the seismic vulnerability of thin RC shear walls in Lima, Peru*”, por L. Quiroz y Maruyama, 2014. Stress, 200(400), 600.

Por otro lado, en México, Carrillo y Alcocer (2012) demostraron que el uso de la malla electrosoldada disminuye significativamente la capacidad de deformación de los muros de baja altura. Utilizaron especímenes de muros delgados de concreto armado ensayados en mesa vibratoria y ensayos cuasiestáticos, se observó que aquellos con malla electrosoldada exhibieron una falla por tensión diagonal gobernada por el agrietamiento y posterior fractura de alambres después de la fluencia plástica del refuerzo a cortante, lo que resultó en una falla frágil debido a la limitada capacidad de elongación del alambre.

Estos hallazgos son consistentes con lo reportado en Colombia por Arroyo et al. (2021), donde determinaron que la falla predominante en una edificación de muros de delgados de concreto reforzados con malla electrosoldada fue la fractura de los alambres, esto ocurriendo prematuramente de manera especial en la base de los muros del primer nivel.

En síntesis, la literatura revisada confirma que la limitada capacidad de elongación de

la malla electrosoldada representa el punto crítico en el desempeño de los muros de ductilidad limitada. Aunque ciertos modelos indican una similitud de desempeño en rangos elásticos, los ensayos experimentales de San Bartolomé, Carrillo y Arroyo demuestran consistentemente que, superado el umbral de fluencia, la malla electrosoldada precipita una degradación abrupta de resistencia por fractura del refuerzo. Dado que este modo de falla frágil incrementa sustancialmente el riesgo de colapso ante eventos sísmicos severos, resulta necesario desarrollar curvas de fragilidad que comparen ambos sistemas, proporcionando así una herramienta analítica precisa para evaluar la conveniencia de estos refuerzos en la alta sismicidad de Lima.

1.2.2. Metodologías de construcción de curvas de fragilidad: enfoque estático y dinámico

El estudio de la fragilidad sísmica mediante enfoques analíticos constituye una herramienta probabilística indispensable ante la escasa disponibilidad de registros de daños en sismos reales o evidencia experimental suficiente. En el contexto de edificaciones estructuradas con muros de ductilidad limitada (MDL), caracterizadas por un comportamiento inelástico complejo, la selección de la metodología de análisis no lineal (ya sea estático o dinámico) resulta determinante, pues influye directamente en la confiabilidad de las curvas de fragilidad generadas.

Bajo esta premisa, se presenta a continuación una revisión del estado del arte sobre las metodologías existentes, contrastando las aproximaciones estáticas y dinámicas a través de un análisis crítico de las investigaciones más relevantes en la materia.

Investigaciones como las de Vargas et al. (2013) confrontaron las metodologías de análisis pushover y de análisis dinámico incremental (IDA) para la evaluación de la vulnerabilidad sísmica por medio de un enfoque probabilista, mediante simulaciones de Montecarlo.

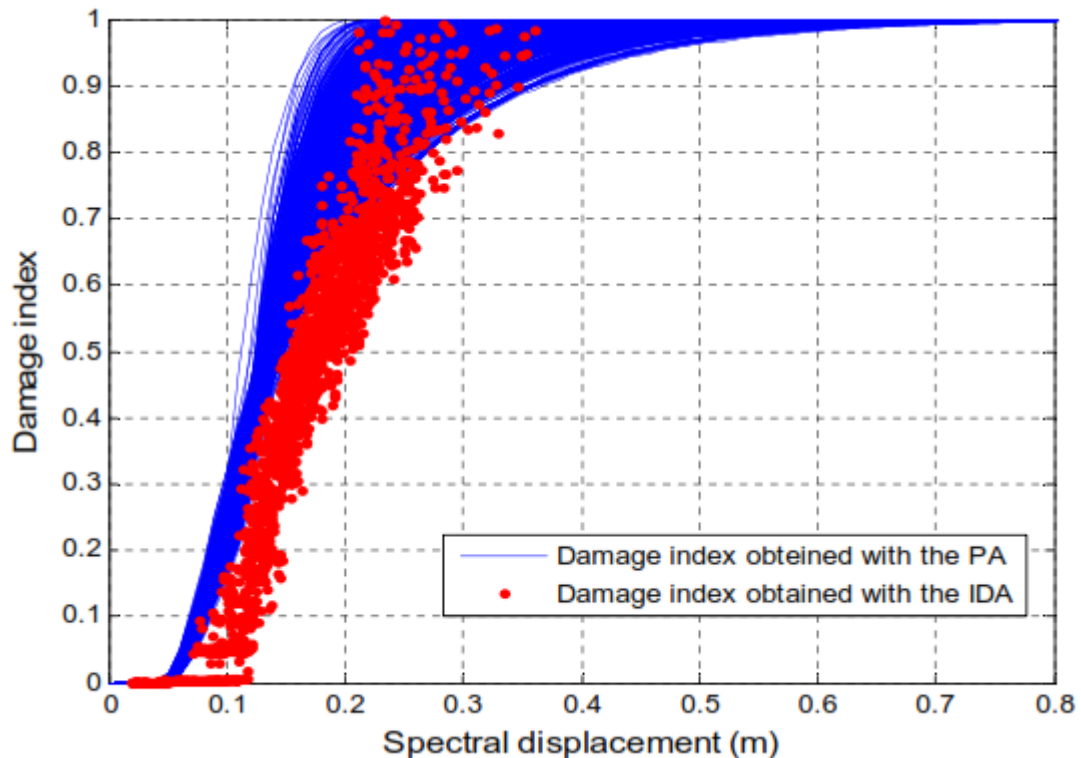
En este estudio, se trataron las propiedades mecánicas de los materiales como variables

aleatorias para capturar la incertidumbre estructural. Para la construcción de las curvas de fragilidad mediante el análisis estático (pushover), transformaron las curvas de capacidad en espectros de capacidad y realizaron una representación bilineal para definir probabilísticamente los umbrales de los estados de daño. Por otro lado, para el análisis dinámico incremental, sometieron a la estructura a registros reales de aceleración escalados.

Los resultados evidenciaron que el método estático tiende a ser más conservador en comparación con el análisis dinámico. Esto se logra visualizar en la Figura 4, donde el enfoque estático predijo el inicio de daño para desplazamientos espectrales menores que los observados en las simulaciones dinámicas. También dio énfasis a la pendiente de las curvas de índice de daño, a pesar de que fueron similares, existió un desplazamiento hacia un lado entre ellas. Los autores sugieren que esta diferencia no invalida los resultados, sino que se puede calibrar los coeficientes que definen los estados de daño en el procedimiento estático para lograr una mejor correlación con la respuesta dinámica obtenida.

Figura 4

Comparación entre el índice de daño obtenido mediante el método estático (pushover) y el método dinámico (IDA)



Nota. Tomado de “*Incremental Dynamic Analysis and Pushover Analysis of Buildings. A Probabilistic Comparison*”, por Vargas et al., 2013. Computational Methods in Applied Sciences (Vol. 26, pp. 293–308).

Por otro lado, Silva et al. (2014) evaluaron la precisión en la respuesta estructural y el costo computacional de distintas metodologías de análisis para derivar funciones de vulnerabilidad.

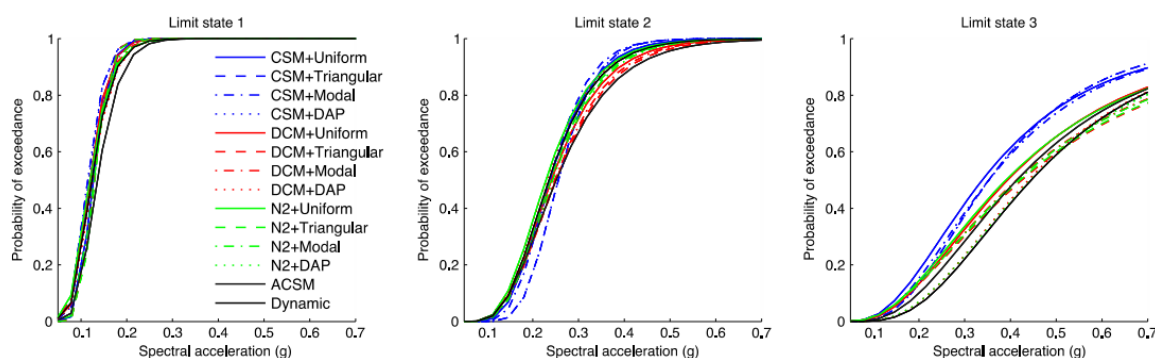
En el enfoque estático no lineal, se examinaron los procedimientos CSM (Método del Espectro de Capacidad), DCM (Método de Coeficientes de Desplazamiento), N2 y ACSM (Método del Espectro de Capacidad Adaptativo). Se observó que los patrones triangulares o uniformes tienden a sobreestimar la probabilidad de daño severo o colapso (Estado límite 3). Aunque resaltaron que los procedimientos adaptativos (DAP), los cuales actualizan la rigidez

del sistema en cada iteración, capturaron mejor la degradación de rigidez de la estructura. Como se aprecia en la Figura 5, la variación entre las metodologías es mínima para el estado límite 1 (daño leve), donde se espera una respuesta mayormente elástica, pero para el estado límite 3, las diferencias son notables, confirmando la sobreestimación del daño por parte de los métodos estáticos convencionales.

Finalmente, aunque el análisis dinámico se establece como la línea base de mayor precisión, los autores destacan su alto costo computacional y frecuentes problemas de convergencia.

Figura 5

Comparación de curvas de fragilidad generadas mediante metodologías estáticas y dinámicas para tres estados de límite de daño



Nota. Tomado de “*Evaluation of analytical methodologies used to derive vulnerability functions*”, por Silva et al., 2014. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 43(2).

Este nivel de sofisticación metodológica toma relevancia en el contexto de edificaciones con muros de ductilidad limitada, donde el comportamiento difiere significativamente de los sistemas convencionales de concreto armado debido a su reducida capacidad de deformación inelástica. Investigaciones como las de Araújo (2021) y López y Rodríguez (2018), han implementado estrategias avanzadas para mitigar la incertidumbre asociada a esta tipología.

Mientras López y Rodríguez (2018) se apoyaron en la simulación de Montecarlo

combinada con el muestreo de Hipercubo Latino para incorporar la aleatoriedad de las propiedades mecánicas de los materiales dentro de un análisis dinámico utilizando señales sintéticas.

Por su parte, Araújo (2021) propuso una metodología integral que utiliza el análisis estático no lineal (pushover) para identificar mecanismos de colapso (rotura del alambre o aplastamiento del concreto) y cuantificar la sobrerresistencia antes de proceder a la evaluación probabilística. Posteriormente, complementó este enfoque con un análisis dinámico basado en Espectros de Escenario Condicional (CSS), utilizando registros de sismos reales para una cuantificación rigurosa del riesgo sísmico.

Finalmente, el análisis comparativo de las metodologías evidencia que, si bien los procedimientos dinámicos ofrecen una mayor exactitud en la predicción de la demanda, su complejidad restringe la cantidad de evaluaciones posibles. Por consiguiente, la literatura valida el uso del análisis estático no lineal (pushover) potenciado por un enfoque probabilístico. Este enfoque permite procesar miles de escenarios de variabilidad material para definir los estados de daño, ofreciendo una solución que compensa la tendencia conservadora del método estático a través del tratamiento riguroso de la aleatoriedad propio del sistema.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar la influencia del uso de malla de acero dúctil frente a la malla electrosoldada en la fragilidad sísmica de edificaciones con muros de ductilidad limitada (MDL) situadas en la zona sísmica de Lima, mediante análisis estructurales no lineales y probabilísticos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar los estados límite de daño aplicables a edificaciones de muros de ductilidad limitada, correlacionando el parámetro de demanda ingenieril (PDI) con la evidencia obtenida de ensayos experimentales, modelos numéricos y reportes de daños

observados en sismos severos.

- Construir las curvas de fragilidad sísmica para ambos sistemas de refuerzo, definiendo la probabilidad de excedencia de los estados de daño en función de la deriva de entrepiso.
- Interpretar los resultados comparativos para establecer cuál sistema de refuerzo presenta menor fragilidad y mayor confiabilidad estructural frente a diferentes niveles de intensidad sísmica.

1.4. Justificación

1.4.1. Práctica

Esta investigación es de gran relevancia práctica porque aborda la evaluación de la fragilidad sísmica de edificaciones con muros de ductilidad limitada (MDL), una solución estructural ampliamente utilizada en Lima debido a su costo accesible y rapidez constructiva. Sin embargo, el comportamiento de estas edificaciones bajo eventos sísmicos no ha sido suficientemente estudiado, especialmente al considerar las diferencias entre los refuerzos con malla de acero dúctil y malla electrosoldada.

El desarrollo de esta investigación permitirá generar curvas de fragilidad específicas para estas edificaciones, las cuales son herramientas clave para estimar la probabilidad de daño ante distintos niveles de intensidad sísmica. Esto proporcionará información valiosa para ingenieros estructurales, quienes podrán tomar decisiones más informadas en la selección de materiales, mejorando así la seguridad y el desempeño de las estructuras existentes y futuras.

Esta investigación tiene un impacto directo en la práctica de la ingeniería civil, ya que aporta herramientas y recomendaciones concretas para mejorar la seguridad estructural, reducir el riesgo sísmico y proteger la vida de las personas y los bienes materiales.

1.4.2. Social

Desde una perspectiva social, esta investigación aborda una problemática de gran

relevancia para la seguridad y bienestar de las comunidades urbanas. Las edificaciones con MDL son frecuentemente utilizadas en sectores de ingresos medios y bajos, donde el acceso a viviendas resistentes frente a sismos suele ser limitado. (Gonzales, 2010)

Evaluar la fragilidad sísmica de estas edificaciones permitirá identificar las principales debilidades estructurales que podrían poner en riesgo la vida de sus ocupantes durante un evento sísmico severo.

La generación de conocimiento sobre el comportamiento sísmico de estas edificaciones contribuirá a reducir las desigualdades en términos de acceso a viviendas seguras. Además, al ofrecer recomendaciones basadas en evidencia para la selección de materiales de refuerzo, esta investigación tendrá un impacto directo en la protección de las comunidades más expuestas a desastres naturales, fortaleciendo así la resiliencia social y promoviendo un desarrollo urbano más seguro.

1.5. Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

Las edificaciones con muros de ductilidad limitada reforzados con malla de acero dúctil presentan una menor fragilidad sísmica y una menor probabilidad de daño estructural, en comparación con las edificaciones reforzadas con malla electrosoldada en la zona sísmica de Lima.

1.5.2. Hipótesis específicas

- Los estados límites de daño para edificaciones de MDL pueden definirse mediante derivas de entrepiso, permitiendo una correlación entre los modelos numéricos y daños observados en ensayos o sismos pasados.
- Las curvas de fragilidad correspondientes a muros con malla de acero dúctil muestran menores probabilidades de alcanzar cada estado de daño en comparación con las curvas obtenidas para muros con malla electrosoldada ante un mismo escenario.

- El sistema de refuerzo con malla de acero dúctil presenta menor fragilidad y mayor confiabilidad estructural que el sistema con malla electrosoldada frente a diferentes niveles de intensidad sísmica.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. Sistema de muros de ductilidad limitada

Los muros de ductilidad limitada (MDL) son un tipo de sistema estructural diseñado para resistir las cargas sísmicas y gravitacionales en edificaciones. Se caracterizan por estar compuestos principalmente de muros de concreto armado con espesores reducidos, lo que limita su capacidad de deformación inelástica. Aunque estos muros son eficaces para soportar cargas, su capacidad para absorber energía durante un sismo es restringida (Muñoz et al., 2010).

Estos muros se construyen sin extremos confinados, lo que implica que el refuerzo vertical se organiza en una sola capa, como se observa en la Figura 6. Esta configuración no solo facilita la construcción, sino que también contribuye a la rigidez de la estructura. Generalmente, los muros de ductilidad limitada presentan un espesor de 10 cm y utilizan acero de grado 60 ($f_y=4200 \text{ kgf/cm}^2$), junto con mallas electrosoldadas de tipo CA-50 ($f_y=5000 \text{ kgf/cm}^2$) para reforzarlos. Los sistemas de piso asociados suelen ser losas macizas o aligeradas, que actúan como diafragmas rígidos, ayudando a distribuir las cargas de manera eficiente (San Bartolomé, 2006)

Una de las características más importantes de los muros de ductilidad limitada es su alta rigidez, que les permite resistir cargas sísmicas de forma efectiva. Sin embargo, esta rigidez también significa que su ductilidad es limitada, lo que implica que no pueden deformarse significativamente sin riesgo de fallo estructural. Este aspecto es crucial, ya que un diseño adecuado debe garantizar que la estructura pueda soportar un sismo sin colapsar, al tiempo que permite una eventual reparación.

Es relevante destacar que, según la normativa peruana, los edificios construidos con este sistema no deben exceder los 8 pisos. Esta restricción se debe a que, a mayor altura, las demandas sísmicas aumentan, lo que podría comprometer la estabilidad de estructuras con

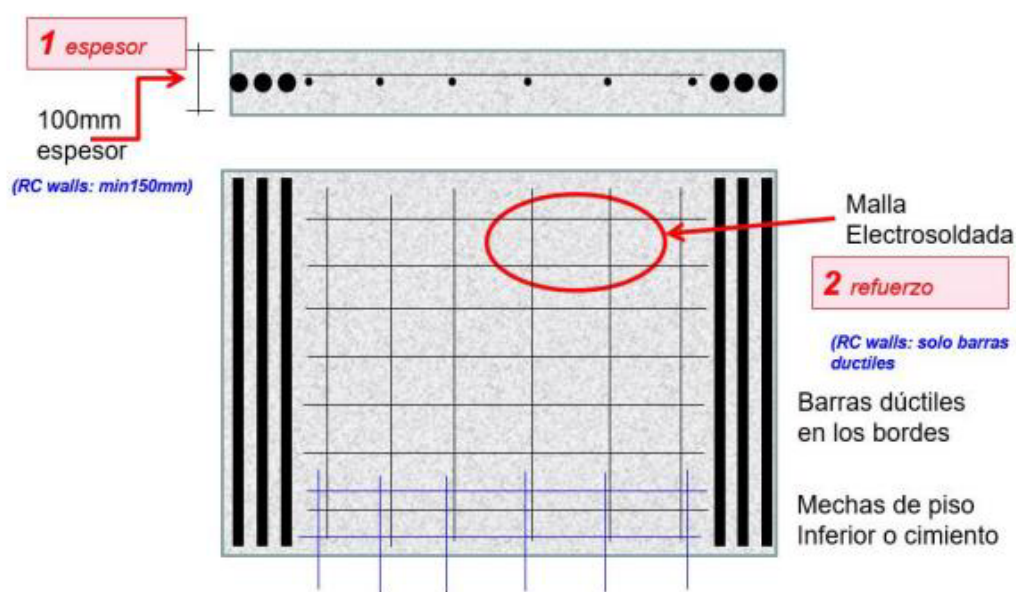
ductilidad limitada (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO], 2018).

Asimismo, la malla electrosoldada, utilizada en este sistema, son un tipo de refuerzo prefabricado conformado por alambres longitudinales y transversales que se unen mediante un proceso de soldadura eléctrica. Esta técnica crea una estructura continua y uniforme, ideal para aplicaciones en la construcción de muros y losas. Los alambres, elaborados a partir de varillas de acero a través de un proceso de trefilado o laminado en frío, presentan una alta resistencia y una longitud adecuada, lo que mejora la eficiencia en el uso de materiales (Carrillo et al., 2016).

Entre sus principales ventajas, las mallas electrosoldadas se destacan por su facilidad de instalación, resistencia al fuego, ligereza y durabilidad, por lo que se convierte en una opción viable frente a otras opciones de refuerzo ya que facilita una construcción más rápida y económica (Al-Rousan, 2021).

Figura 6

Configuración convencional de refuerzo en muros de ductilidad limitada



Nota. Tomado de “Informe de la revisión de criterios de diseño de edificaciones con muros de

ductilidad limitada”, por Díaz, 2021. Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento.

2.1.2. Ingeniería sísmica basada en desempeño

2.1.2.1. Fundamentos y objetivos del enfoque de desempeño. El diseño sísmico tradicional se ha caracterizado en seguir las disposiciones de un código prescriptivo, cuyo fin es la de evitar la pérdida de vidas humanas, minimizando los daños y probable colapso de las estructuras (SENCICO, 2018).

Sin embargo, este enfoque tiene una limitante, el desconocimiento del estado de la estructura luego del sismo ocurrido. Ante esto surgió una metodología la cual evalúa la respuesta estructural para que esta pueda alcanzar objetivos de desempeño específicos frente de sismos de distinta magnitud (Nastri y Pisapia, 2025).

Las primeras bases para esta metodología aparecieron en documentos como SEAOC-Vision 2000, ATC-40 y FEMA-273 por los años 90, en los cuales establecieron los niveles de desempeño para medir el daño de los componentes estructurales y no estructurales, los niveles de amenaza sísmica esperada y los objetivos de desempeño, cuya finalidad era la de prevalecer la seguridad y funcionalidad de una estructura luego de un sismo (Arciniegas, 2020).

2.1.2.2. Niveles de desempeño y estados límite de daño (ELD). En el ámbito de la ingeniería sísmica, los conceptos de niveles de desempeño y estados límite de daño son fundamentales para evaluar y predecir el comportamiento de las estructuras ante distintos niveles de intensidad sísmica.

Los niveles de desempeño establecen límites de daño aceptables para una estructura, garantizando su continua funcionalidad, protección de las vidas humanas o prevención al colapso total, según sea la meta u objetivo buscado. Normativas y documentos técnicos de referencia, como SEAOC Vision 2000 y ATC-40, los han clasificado en categorías como:

- Ocupación Inmediata (IO/OI)
- Protección de la Vida (PV/LS)

- Seguridad al colapso (SC/CP/Estabilidad Estructural)
- Colapso

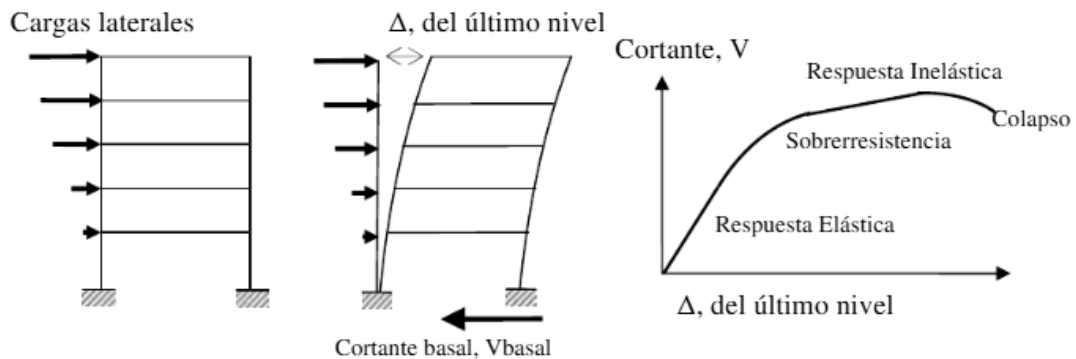
Por su parte, los estados límite de daño (ELD) constituyen la traducción física de los niveles anteriores. Representan los patrones de deterioro observables y cuantificables que experimentan los elementos estructurales. Estos estados categorizan la severidad de las fallas (desde fisuras superficiales hasta deformaciones permanentes críticas), utilizando escalas de deterioro (daño leve, moderado, severo o completo) que permiten verificar si la estructura ha cumplido con el desempeño objetivo.

2.1.3. Análisis estático no lineal

El análisis estático no lineal, más conocido como análisis pushover, es un método avanzado para evaluar el comportamiento de una estructura durante un sismo. A diferencia del análisis convencional, donde los materiales siempre se comportan de la misma manera (linealmente), el método pushover considera que, bajo la fuerza de un terremoto, los materiales pueden deformarse permanentemente y cambiar su rigidez. El resultado es una evaluación más realista de su desempeño sísmico en comparación con los métodos lineales tradicionales (Moreno et al., 2007). Este procedimiento consiste en la aplicación gradual de una carga lateral que simula la acción sísmica tal como se muestra en la Figura 7. La carga incremental continuará hasta que la estructura llegue a su capacidad última de resistencia o a un desplazamiento objetivo.

Figura 7

Procedimiento del análisis estático pushover



Nota. Tomado de “*Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica (Methodological proposal for the evaluation of the structural behavior of a metallic rack)*”, por Arango et al., 2013. Revista EIA. 12(6).

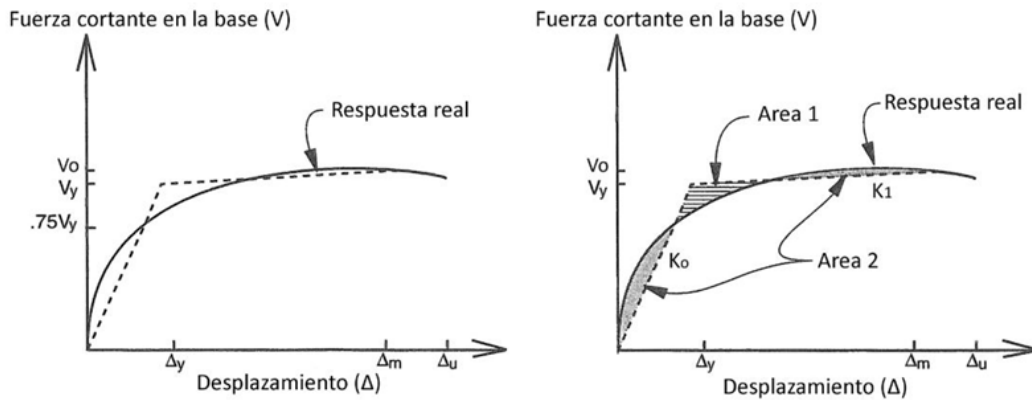
2.1.3.1. Curva de capacidad estructural. La curva de capacidad se obtiene mediante el análisis estático no lineal y muestra la relación entre la fuerza cortante en base y el desplazamiento hacia la dirección evaluada del último nivel de la estructura. Esta permite caracterizar la respuesta inelástica del edificio (Sáenz, 2019).

Su representación bilineal es una manera simplificada de idealizar la curva de capacidad real, y está compuesta por dos líneas rectas. Esto facilita el análisis con el fin de obtener parámetros sísmicos de interés como el punto de fluencia efectiva, máxima resistencia o capacidad última.

Para generar este modelo se utiliza el criterio de las áreas iguales (Figura 8), esto quiere decir que el Área 1 sobre la curva de capacidad real y la representación idealizada será igual que la suma de las Áreas 2 debajo la curva de capacidad real y la representación idealizada, el cumplimiento de este criterio asegura que la energía total disipada del modelo bilineal sea equivalente a la curva de capacidad de la estructura (Moreno et al., 2007).

Figura 8

Representación bilineal de la curva de capacidad



Nota. Adaptado de “*Structural Response Modification Factors*”, por Applied Technology Council, 1995. Redwood City, California.

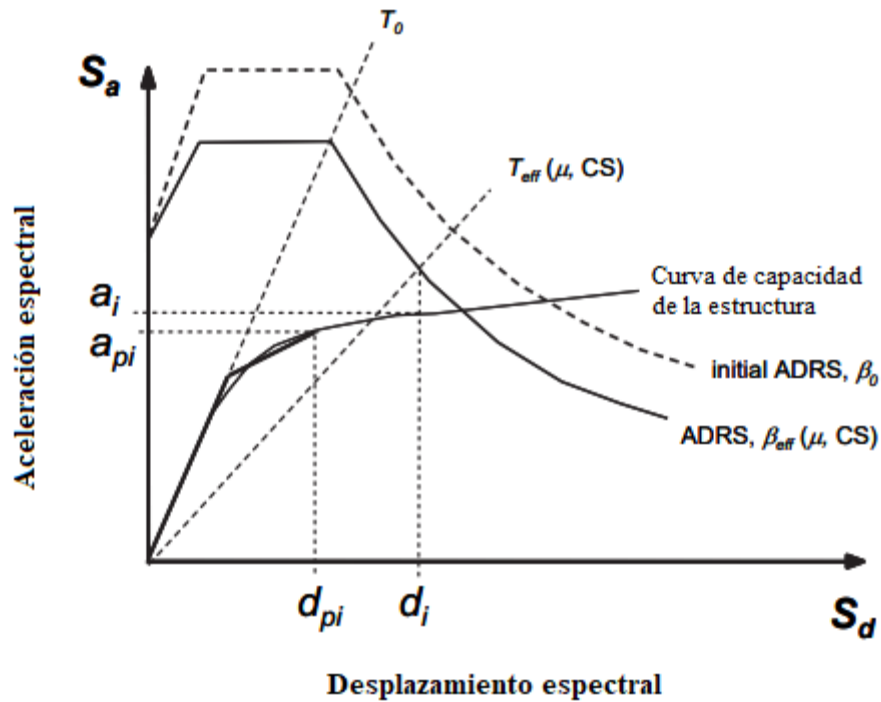
2.1.3.2. Espectro de capacidad y punto de desempeño. El espectro de capacidad es una representación de la curva de capacidad, pero en un formato conocido como ADRS, que relaciona la aceleración espectral con el desplazamiento espectral.

El propósito fundamental de esta conversión es poder superponer el espectro de capacidad sobre el espectro de demanda (Figura 9) para obtener el punto de desempeño (Moreno et al., 2007).

El punto de desempeño es el punto de intersección de ambos espectros previamente mencionados, el cual indica el daño y comportamiento esperado de la estructura bajo una demanda específica (Sáenz, 2019).

Figura 9

Método del espectro de capacidad (MEC)



Nota. Adaptado de “*Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures*”, por FEMA 440, 2005. Applied Technology Council (ATC-55 Project) for the Federal Emergency Management Agency. Washington, USA.

2.1.4. Evaluación probabilística de la fragilidad sísmica

2.1.4.1. Conceptos de vulnerabilidad y fragilidad sísmica. La vulnerabilidad sísmica se refiere a la predisposición inherente de una estructura a sufrir daño cuando es sometida a una actividad sísmica. Esta susceptibilidad al daño dependerá de características propias de la estructura como la calidad de material utilizado en la construcción, técnicas constructivas empleadas, antigüedad, altura de la estructura, irregularidad, etc. (Velazco y Rodríguez, 2024).

La fragilidad sísmica, por su parte, expresa la probabilidad de que una edificación sufra un nivel de daño específico (desde relación fisuras leves hasta el colapso), al ser sometida a un

sismo de una intensidad concreta. Esta relación se suele visualizar mediante las "curvas de fragilidad" (Cotrado, 2017).

2.1.4.2. Parámetro de demanda ingenieril (PDI) y su relación con los ELD. El parámetro de demanda ingenieril funciona como una métrica cuantitativa de la respuesta estructural que es directamente observable o calculable a partir de un análisis estructural lineal o no lineal.

La clasificación de estos parámetros se realiza en función de la escala de análisis, distinguiendo entre el comportamiento local y el global. A escala local, los parámetros se enfocan en la respuesta de elementos estructurales específicos, siendo fundamentales para identificar el inicio de la no linealidad y los modos de falla. En esta categoría se incluyen la rotación plástica en extremos de vigas y columnas, la deformación unitaria (strain) en el acero de refuerzo y la curvatura en secciones críticas. Por otro lado, la escala global emplea parámetros que describen la respuesta integrada de todo el sistema estructural. Estos son esenciales para evaluar el desempeño general, la estabilidad y el nivel de daño agregado, destacando entre ellos la deriva de entrepiso, la energía de histéresis disipada y la ductilidad global (Moreno et al., 2007).

El parámetro de demanda ingenieril (PDI) es la variable fundamental que permite traducir los estados límite de daño (ELD), que son cualitativos, a umbrales cuantitativos y medibles.

2.1.4.3. Funciones y curvas de fragilidad. La función de fragilidad es una representación matemática subyacente, que cuantifica la probabilidad de la estructura alcance o exceda un estado de daño predefinido. Por lo general, esta función es modelada mediante una distribución de probabilidad acumulada, comúnmente lognormal.

En términos formales, según HAZUS-MH MR4, la función de fragilidad (Ec.1), que entrega la probabilidad de pertenecer o exceder el estado de daño d_s respecto al desplazamiento

espectral se expresa como:

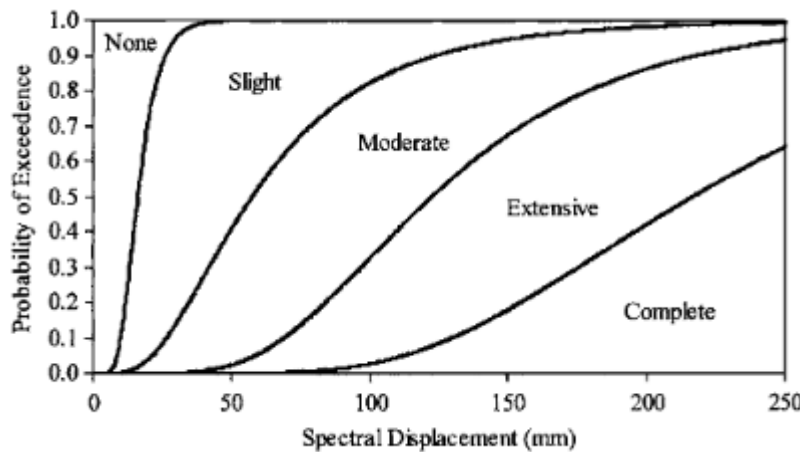
$$P(ds|S_d) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} * \ln \left(\frac{S_d}{\bar{S}_{d,ds}} \right) \right] \quad (Ec. 1)$$

Donde: Φ es la función de distribución acumulativa de la distribución normal estándar, S_d es el desplazamiento espectral, $\bar{S}_{d,ds}$ es la mediana del desplazamiento espectral para el estado de daño “ds” y β la desviación estándar logarítmica natural (dispersión) del desplazamiento espectral.

En contraste, el término curva de fragilidad se reserva para la representación gráfica de dicha función de distribución acumulada (Figura 10), en la figura se puede observar que el eje de las abscisas corresponde al desplazamiento espectral S_d (mm) y el eje de las ordenadas la probabilidad de excedencia $P(ds|S_d)$.

Figura 10

Representación gráfica de curvas de fragilidad



Nota. Tomado de “*Loss Estimation Analysis of Flat-Slab Structures*”, por Erberik y Elnashai, 2006. Natural Hazards Review, 7(1).

La elaboración de estas funciones de fragilidad requiere una integración cuidadosa de datos empíricos, simulaciones numéricas y resultados experimentales. Para aplicarlas a una estructura específica, es fundamental estimar los parámetros θ ($\bar{S}_{d,ds}$) y β (β_{ds}).

III. MÉTODO

3.1. Tipo de investigación

Esta investigación fue de tipo aplicada y cuantitativa. Fue aplicada porque buscó generar conocimiento utilizable directamente para mejorar la seguridad estructural de edificaciones con muros de ductilidad limitada (MDL) en contextos sísmicos, mitigando riesgos comunes en la ejecución de este sistema constructivo.

Asimismo, el enfoque fue cuantitativo, ya que emplea métodos matemáticos, análisis estructural y simulaciones computacionales para evaluar la fragilidad sísmica de las edificaciones. Los datos obtenidos se procesaron mediante técnicas deterministas, especialmente el análisis estático no lineal (pushover), para la posterior construcción de curvas de fragilidad. Esto permitió realizar una evaluación probabilística, midiendo y comparando objetivamente la fragilidad sísmica en diferentes escenarios.

Finalmente, el diseño de la investigación fue de tipo experimental (numérico), dado que se manipuló la variable independiente (tipo de refuerzo) dentro de un entorno virtual mediante el modelamiento computacional, esto con el fin de verificar su efecto directo sobre la variable dependiente (fragilidad sísmica) ante distintos escenarios de amenaza sísmica

3.2. Ámbito temporal y espacial

La presente investigación se desarrolló en la ciudad de Lima, Perú. De manera específica, el caso de estudio estuvo ubicado en el distrito de Chorrillos, caracterizado por presentar un suelo blando. El desarrollo de la investigación abarcó los periodos de agosto de 2025 hasta abril de 2026.

3.3. Variables

3.3.1. *Variable independiente*

Tipo de refuerzo en muros de ductilidad limitada (MDL)

3.3.1.1. Dimensiones

A. Material del refuerzo

- Malla de acero dúctil.
- Malla electrosoldada.

B. Propiedades mecánicas del acero

- Resistencia a la fluencia (f_y).
- Resistencia última (f_u).
- Ductilidad del acero.

3.3.2. Variable dependiente

Fragilidad sísmica de edificaciones con MDL

3.3.2.1. Dimensiones

A. Parámetros estadísticos

- Mediana (θ) para cada estado de daño.
- Desviación estándar logarítmica (β) para cada estado de daño.

B. Probabilidad de daño por estado límite.

- Probabilidad de daño leve.
- Probabilidad de daño moderado.
- Probabilidad de daño severo.
- Probabilidad de colapso.

C. Desempeño estructural

- Intensidad sísmica para alcanzar cada estado de daño.
- Deriva de entrepiso en el punto de desempeño

3.4. Población y muestra

La población estuvo compuesta por todas las edificaciones de viviendas en la ciudad de

Lima que utilizan muros de ductilidad limitada (MDL) como sistema estructural principal, reforzados con malla de acero dúctil o malla electrosoldada.

La muestra de esta investigación estuvo conformada por un grupo representativo de edificaciones con muros de ductilidad limitada (MDL) ubicadas en la ciudad de Lima, seleccionadas con base en criterios de diseño estructural, tipo de refuerzo utilizado (malla de acero dúctil o malla electrosoldada), y características típicas de viviendas de 5 pisos.

3.5. Instrumentos

Los instrumentos que se emplearon en esta investigación para la evaluación de la fragilidad sísmica y el desarrollo de las curvas de fragilidad fueron:

✓ Software de modelado estructural:

ETABS: Para la modelación numérica de las edificaciones con MDL y la ejecución del análisis estático no lineal (pushover).

Excel: Para procesar los resultados del análisis estructural y generar las curvas de fragilidad utilizando el método de distribución lognormal.

✓ Base de datos de ensayos experimentales:

Información previa de pruebas en MDL reforzados con malla de acero dúctil y malla electrosoldada, obtenida de estudios locales y normativas peruanas (como las pruebas del CISMID y LEDI-PUCP).

✓ Normativas y guías técnicas:

Norma Técnica Peruana E.030 Diseño Sismorresistente: Para establecer los parámetros de análisis sísmico de las edificaciones.

Documentos internacionales como HAZUS-MH MR4 y ASCE 41-17: Para la aplicación de criterios de evaluación de desempeño y definición de estados de daño y derivas umbral.

✓ Herramientas de análisis probabilista:

Enfoques analíticos basados en la distribución lognormal, para relacionar la respuesta estructural (deriva de entrepiso) con la probabilidad de excedencia de cada estado límite de daño

✓ **Registros de campo y planos estructurales:**

Documentos que describan las características físicas y estructurales de los edificios seleccionados en la muestra (dimensiones de muros, densidad de refuerzo, propiedades del concreto, entre otros).

Estos instrumentos permitieron construir curvas de capacidad y fragilidad consistentes con HAZUS.

3.6. Procedimientos

El desarrollo de la investigación siguió un enfoque secuencial para garantizar un análisis estructurado y práctico. Primero, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva sobre muros de ductilidad limitada (MDL), con énfasis en los tipos de refuerzo utilizados, como la malla de acero dúctil y la malla electrosoldada. Se recopilaron datos experimentales disponibles de estudios previos realizados por instituciones como el CISMID y el LEDI-PUCP, además de consultar normativas relevantes, como la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente, para establecer los parámetros técnicos y criterios de diseño necesarios para la investigación.

En una segunda etapa, se seleccionó una muestra representativa de edificaciones con MDL, considerando preliminarmente viviendas de entre 2 a 7 pisos típicas de Lima. Se documentaron sus características estructurales principales, como la densidad de muros, el tipo de refuerzo, las propiedades de los materiales y las configuraciones estructurales más comunes.

Posteriormente, se desarrollaron modelos analíticos en ETABS, representando edificaciones reforzadas con malla de acero dúctil y malla electrosoldada. Estos modelos se validaron utilizando datos experimentales previamente recopilados, asegurando una representación adecuada del comportamiento real de las edificaciones bajo condiciones

sísmicas.

El análisis estructural se llevó a cabo mediante el método pushover, que permite obtener las curvas de capacidad estructural de las edificaciones. Estas curvas describieron la relación entre la capacidad de carga y el desplazamiento, identificándose los puntos de desempeño de las estructuras frente a solicitaciones sísmicas de diversa intensidad.

Finalmente, a partir de los resultados del análisis pushover, se construyeron las curvas de fragilidad. El enfoque empleado fue probabilista, utilizando la distribución lognormal para modelar la relación entre la deriva de entrepiso y la probabilidad de excedencia de daño estructural. Estas curvas se generaron para ambos tipos de refuerzo y se compararon entre sí, identificando diferencias significativas en términos de fragilidad sísmica.

La investigación concluyó con un análisis detallado de los hallazgos obtenidos y la formulación de recomendaciones, contribuyendo a la mejora de la seguridad estructural en zonas de alta amenaza sísmica.

3.6.1. Selección del caso base y planteamiento de casos de estudio

Los parámetros geométricos se definieron en base a dos fuentes: i) el compendio de Gonzales (2010), que reúne información de siete edificaciones en Lima y Chiclayo, y ii) la base de datos de Adolfo Galvez Villacorta, integrada por 295 proyectos recopilados de edificaciones de MDL. A partir de estas referencias se estableció dimensiones y proporciones consignadas en la Tabla 2 para una edificación típica del sistema estructural de estudio.

Tabla 2

Parámetros geométricos del edificio

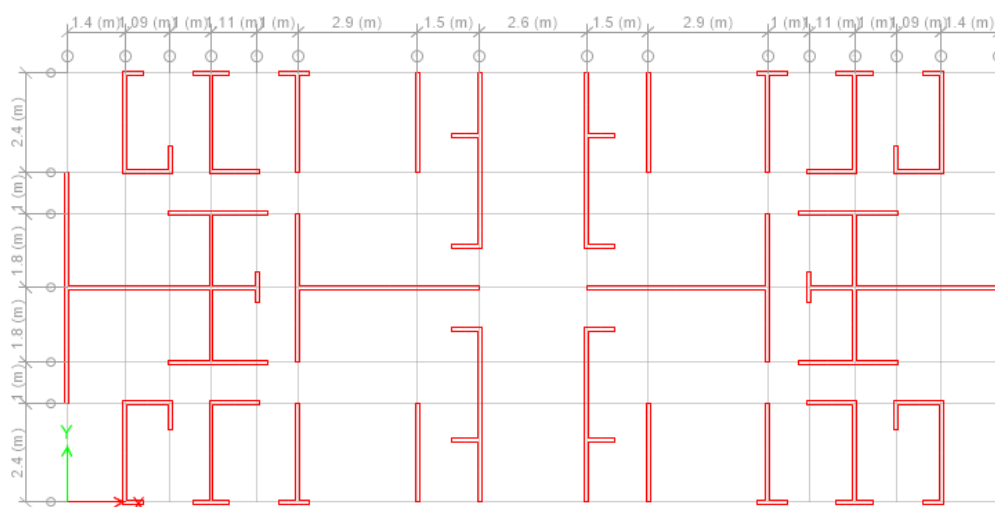
Parámetro	Valor
Nº de pisos	5.00
Área en planta	223.95 m ²
Altura de entrepiso	2.50 m

Altura total	12.50 m
Densidad de muros en X	3.24 %
Densidad de muros en Y	3.69 %
Espesor de muro	0.10 m
Espesor de losa de entepiso	0.10 m – 0.20 m

El caso de estudio seleccionado es una vivienda multifamiliar situada en el distrito de Chorrillos (suelo blando), Lima. La disposición de muros se ilustra esquemáticamente en la Figura 11.

Figura 11

Planta típica del edificio



Para efectos comparativos se desarrollaron 2 modelos estructurales con geometría y configuración equivalentes, diferenciados únicamente por el tipo de refuerzo principal de los muros. Se evaluaron los siguientes escenarios:

Escenario 1 (MDL-EW): Muros de concreto reforzados principalmente con mallas electrosoldadas de acero CA-50 ($f_y = 5000 \text{ kg/cm}^2$). Los elementos de borde incorporan barras de acero corrugado ASTM A615 Grado 60 ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$).

Escenario 2 (MDL-DB): Muros de concreto cuyo refuerzo principal y elementos de borde emplean acero corrugado ASTM A615 Grado 60 ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$).

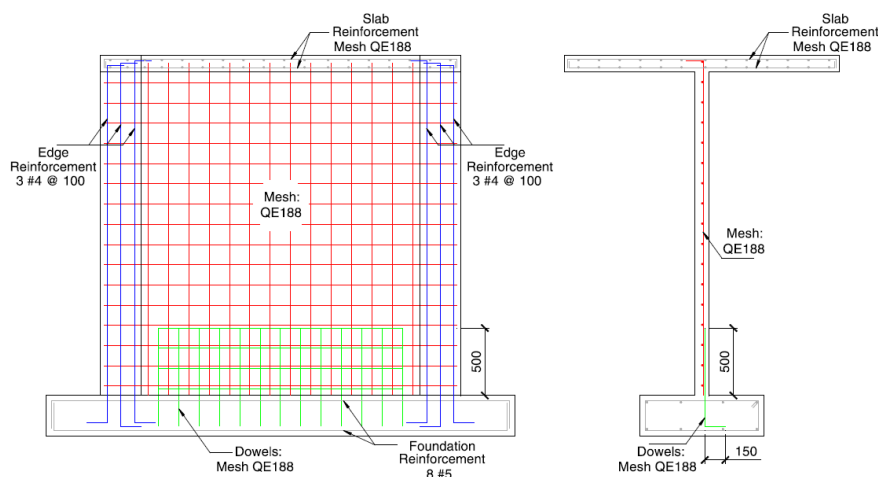
3.6.2. Correlación numérico - experimental de muros de concreto

Para verificar la capacidad de predicción del modelo estructural, en el software ETABS v19.1 (Computers and Structures, Inc. [CSI], 2021) se reprodujeron dos ensayos de referencia y se comparó la respuesta obtenida del programa computacional con lo registrado en el laboratorio.

El primer caso corresponde al espécimen MQE257EP-01 (Figura 12) reportado por Zavala (2004): un muro de 2.40m de alto, 2.65m de longitud y 0.10 de espesor, armado en el alma con una malla electrosoldada de $\phi 7\text{mm}$ y tres barras corrugadas de $\phi 1/2''$ en cada borde. El concreto presentó $f'_c = 175 \text{ kg/cm}^2$. El ensayo aplicó una carga axial de 19t y un protocolo cíclico compuesto por trece etapas, con dos ciclos por etapa.

Figura 12

Especimen MQE257EP-01



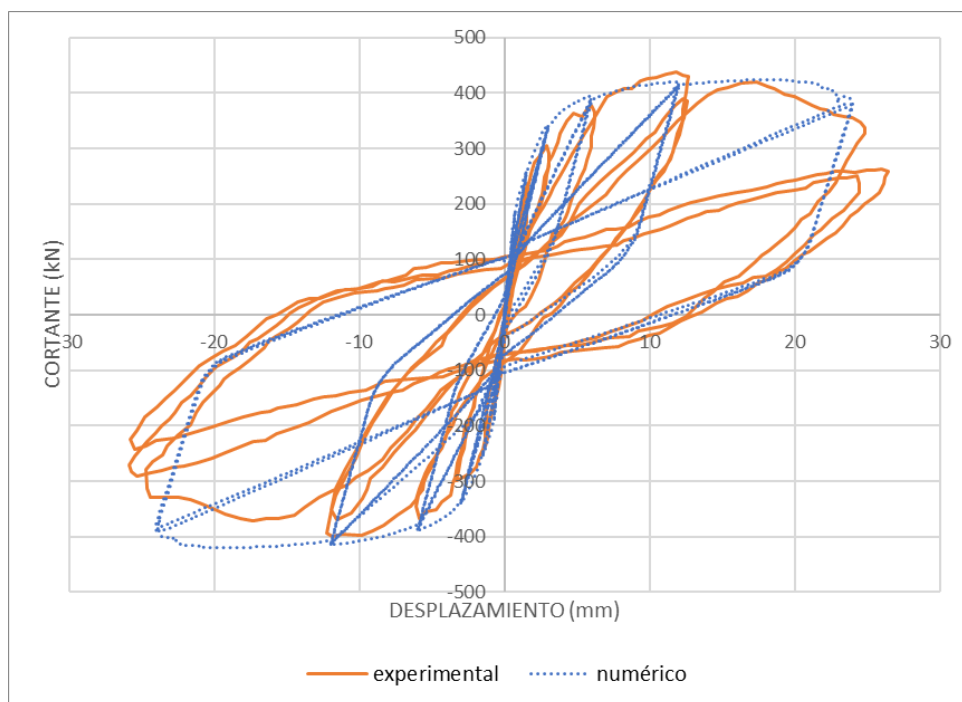
Nota. Tomado de “Ensayo en muros y vivienda de una sola planta reforzada con malla electrosoldada UNICO/FORSA/PRODAC”, por Zavala, 2004. Reporte de Investigación CISMID/FIC/UNI.

Con estas condiciones, el modelo numérico produjo adecuadamente la rigidez inicial,

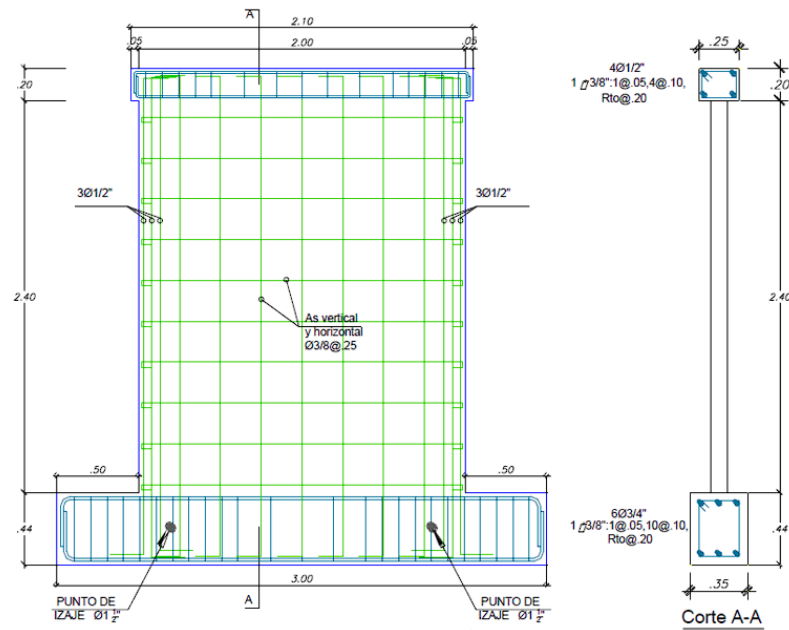
el desplazamiento máximo y capacidad resistente máxima, lo que avala su correspondencia con la evidencia experimental (Figura 13).

Figura 13

Curvas histeréticas experimental vs. numérica del espécimen MQE257EP-01



El segundo caso replica el espécimen MDL-07 (Figura 14) de Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO] y Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú [LEDI-PUCP] (2016): un muro de 2.4m de altura, 2m de longitud y 0.1m de espesor, armado en el alma con una malla de barras corrugadas de $\phi 3/8''$ cada 25cm en ambas direcciones y tres barras corrugadas de $\phi 1/2''$ en cada borde. El concreto presentó $f'_c = 175 \text{ kg/cm}^2$. El ensayo aplicó una carga axial de 19t y un protocolo cíclico compuesto por trece etapas, con dos ciclos por etapa, incrementando la demanda hasta una deriva de 1.27%.

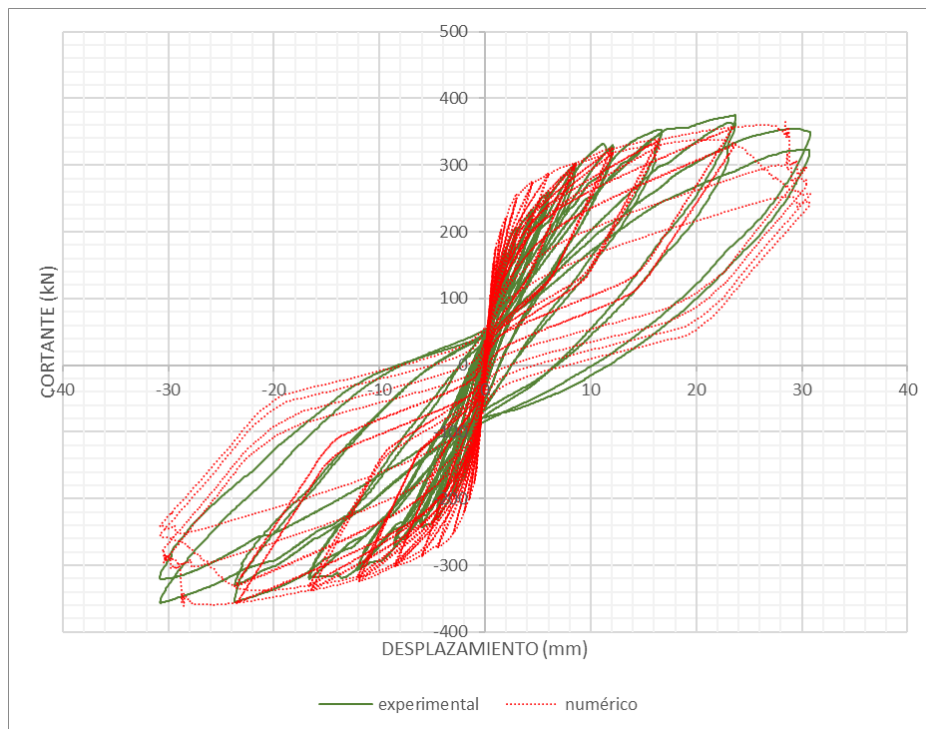
Figura 14*Espécimen MDL-07*

Nota. Tomado de “*Servicios de ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros de ductilidad limitada*”, por (SENCICO y LEDI-PUCP, 2016). Reporte de Investigación CISMID/FIC/UNI.

En este caso, la simulación sobreestimó la rigidez inicial respecto del laboratorio, sin embargo, el desplazamiento máximo y la capacidad resistente máxima resultaron consistentes con el comportamiento medido (Figura 15).

Figura 15

Curvas histeréticas experimental vs. numérica del espécimen MDL-07



3.6.3. Modelado de la no linealidad

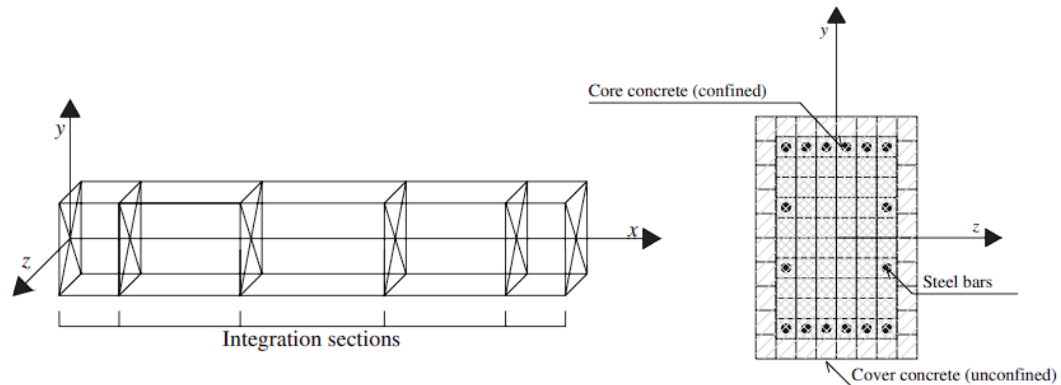
3.6.3.1. Modelo de inelasticidad distribuida (modelo de fibras). En los modelos basados en fibra, el miembro estructural se divide en varias secciones transversales de control que se discretizan en un número determinado de fibras a lo largo de toda su longitud (Figura 16(a)). A cada fibra se le asigna una relación tensión-deformación histerética uniaxial según el tipo de material (por ejemplo, concreto no confinado y acero de refuerzo), como se observa en la Figura 16(b). Luego, el comportamiento global del elemento se extrae integrando el comportamiento de todas las secciones de control obteniendo tensiones resultantes como fuerza axial y momentos, así como la relación de fuerza axial-deformación (Calabrese et al., 2010).

Sin embargo, los elementos a base de fibra generalmente no tienen en cuenta las deformaciones por corte o fenómenos locales como pandeo de barras, delaminación del concreto, etc.

Para el desarrollo de esta investigación, se adoptó el enfoque de modelado de plasticidad distribuida tipo fibra para reproducir el comportamiento de los muros de concreto.

Figura 16

(a) Ejemplo de control de secciones a lo largo del elemento (b) discretización de la sección tipo fibra



Nota. Tomado de “*Numerical issues in distributed inelasticity modeling of RC frame elements for seismic analysis*”, por Calabrese et al., 2010. Journal of Earthquake Engineering, 14(SUPPL.1).

3.6.3.2. Modelos constitutivos de los materiales. Los modelos constitutivos de los materiales son representaciones matemáticas que describen cómo un material responde a distintos tipos de carga y son presentados como una relación esfuerzo-deformación. Para la obtención de estos modelos se realizan pruebas experimentales para conocer del comportamiento del material y así realizar las primeras formulaciones matemáticas que intenten replicar los resultados obtenidos, posteriormente se valida dicha formulación a través de ensayos adicionales (Gao, 2018).

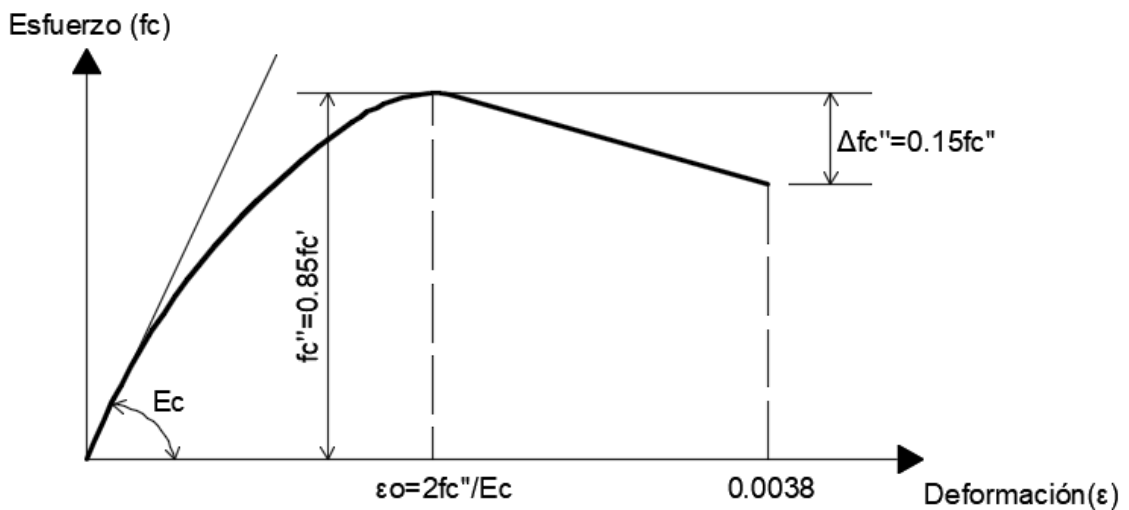
Para el concreto se aplicó el modelo de Hognestad. Este modelo constitutivo describió el comportamiento no confinado a compresión de los muros de concreto, la Figura 17 presenta la curva esfuerzo-deformación correspondiente que consta de dos tramos, el primer tramo con una forma curvada y el segundo tramo recto calculados por la Ec. 2

$$f'_c = \begin{cases} f''_c * \left[\frac{2 * \varepsilon}{\varepsilon_o} * \left(1 - \frac{\varepsilon}{2 * \varepsilon_o} \right) \right], & 0 < \varepsilon < \varepsilon_o \\ f''_c * \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_o}{\varepsilon_u - \varepsilon_o} \right) \right], & \varepsilon_o < \varepsilon < \varepsilon_u \end{cases} \quad (Ec. 2)$$

Donde: $\varepsilon_o = 2f''_c/E_c$; $E_c = 126552.6 + 32.34f''_c$ (kg/cm^2); $\varepsilon_u = 0.0038$; f'_c es el esfuerzo a compresión del concreto no confinado, ε_o es la deformación del esfuerzo máximo del concreto no confinado, ε_u es la deformación última del concreto no confinado y E_c es el módulo de elasticidad del concreto.

Figura 17

Relación esfuerzo-deformación del concreto no confinado en compresión planteado por Hognestad



Nota. Adaptado de “*A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members*”, por Hognestad E., 1951. Bulletin Series No. 399

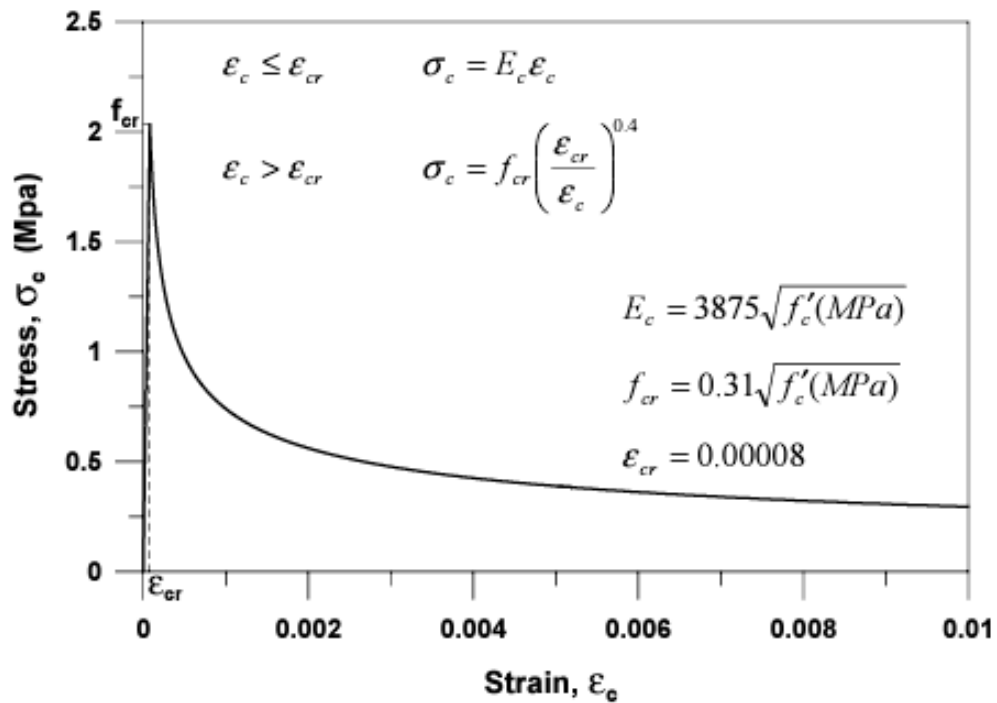
Se eligió el modelo de Belarbi y Hsu mostrado en la Figura 18 para representar el comportamiento del concreto a tracción de los muros de concreto, esta curva fue formulada mediante dos ecuaciones (Ec. 3) cada una de las cuales describe un tramo específico de la curva.

$$\sigma_c = \begin{cases} E_c * \varepsilon_c, & \varepsilon_c < \varepsilon_{cr} \\ f_{cr} * \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_c}\right)^{0.4}, & \varepsilon_c > \varepsilon_{cr} \end{cases} \quad (Ec. 3)$$

Donde: $E_c = 3875 \sqrt{f'_c (MPa)}$; $\varepsilon_{cr} = 0.00008$; $f_{cr} = 0.31 \sqrt{f'_c (MPa)}$; f_{cr} es el esfuerzo a tensión del concreto, ε_{cr} es la deformación del esfuerzo máximo del concreto a tensión y E_c es el módulo de elasticidad del concreto.

Figura 18

Relación esfuerzo-deformación del concreto en tensión planteado por Belarbi y Hsu.



Nota. Tomado de “*Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled-Shear-Flexural Responses*”, por Orakcal et al., 2006. Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.

Finalmente, el modelo constitutivo del acero se presenta como una curva completa como se muestra en la Figura 19, esta relación fue planteada por Park y Paulay, y está conformada por 3 zonas, una primera zona elástica, una segunda zona una vez llegada al punto de fluencia conocida como plataforma de fluencia y finalmente una tercera una zona de

endurecimiento la cual tiene forma de parábola, estas tres zonas se rigen por la Ec. 4.

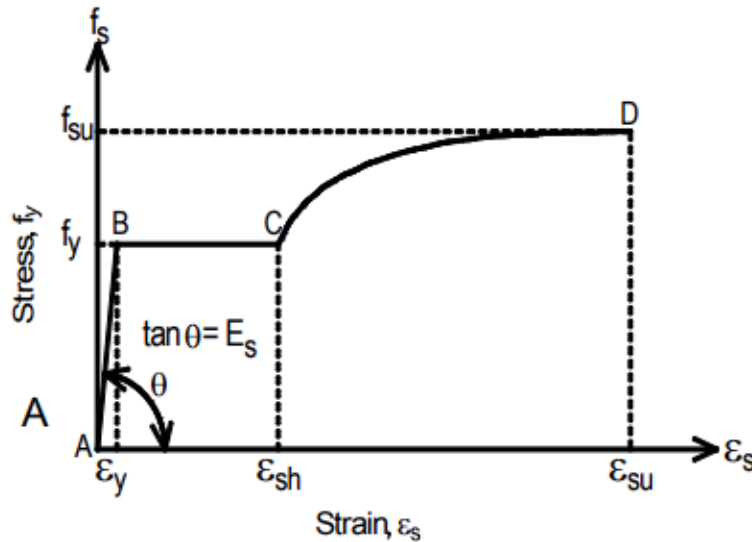
$$f_s = \begin{cases} \varepsilon_s * E_s, & 0 \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ f_y, & \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{sh} \\ f_y * \left[\frac{m * (\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2}{60 (\varepsilon_s - \varepsilon_{sh}) + 2} + \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_{sh})(60 - m)}{2(30r + 1)^2} \right], & \varepsilon_{sh} \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{su} \end{cases} \quad (Ec. 4)$$

$$\text{Donde: } \varepsilon_y = f_y/E_s; \varepsilon_{sh} = 16\varepsilon_y; m = \left(\left(\frac{f_{su}}{f_y} \right) (30r + 1)^2 + 60r - 1 \right) / 15r^2; r =$$

$$\varepsilon_{su} - \varepsilon_{sh}$$

Figura 19

Relación esfuerzo-deformación para el acero planteado por Park y Paulay.



Nota. Tomado de “Reinforced Concrete Structures”, por Park y Paulay, 1975. John Wiley and Sons, Inc., Canada.

3.6.4. Definición de estados de daño y construcción de curvas de fragilidad

Se definieron cuatro estados de daño discretos (DS1 a DS2) basados en la propuesta inicial del manual de HAZUS-MH MR4, pero siendo adaptados al sistema estructural estudiado para ambos reforzamientos a evaluar. Para esto se tuvo en consideración las observaciones experimentales resultantes reportados por (Carrillo y Alcocer, 2012; Cotrado, 2017; L. G. Quiroz y Maruyama, 2014; SENCICO y LEDI-PUCP, 2016).

La Tabla 3 describe la progresión del daño para cada estado de daño.

Tabla 3

Definición de estados de daño y fallas observadas para muros de ductilidad limitada

Estado de Daño	Descripción según HAZUS-MH MR4	Falla observada esperada
DS1 (Leve)	Daño estético, habitable	Fisuras diagonales finas (<1mm).
DS2 (Moderado)	Daño reparable	Extensión de las fisuras diagonales, inicio de fluencia de las barras o alambres. Desprendimiento leve de recubrimiento.
DS3 (Severo)	Daño estructural extenso	Grandes grietas diagonales, descascaramiento importante del concreto, inicio de trituración del concreto en los talones.
DS4 (Completo)	Colapso o demolición	Pandeo del refuerzo vertical, ruptura de barras o alambres. Pérdida de estabilidad

De las formulaciones teóricas expuestas en el capítulo anterior, para este análisis específico se utilizará la ecuación Ec.5 basada en la deriva de entrepiso (Drift) como parámetro de medida. Esta elección representa la correlación directa entre el desplazamiento lateral y el daño físico observado en ensayos experimentales, siendo la deriva el indicador más eficiente

para capturar el comportamiento de ambos tipos de reforzamiento.

Para ello, se emplea la función expresada en términos de deriva:

$$P(DS \geq ds_i | \delta) = \Phi \left[\frac{1}{\beta_{ds,i}} * \ln \left(\frac{\delta}{\theta_{ds,i}} \right) \right] \quad (Ec. 5)$$

Donde:

δ : Deriva de entrepiso

$\theta_{ds,i}$: Mediana de deriva para el estado de daño i

$\beta_{ds,i}$: Desviación estándar logarítmica para el estado de daño i

Para la definición de la mediana ($\theta_{ds,i}$), se consideró los límites de deriva observados en las investigaciones de Carrillo et al. (2012) y SENCICO y LEDI – PUCP (2016). Estos límites fueron resultado de los ensayos cíclicos en muros de concreto de espesor reducido para ambos tipos de reforzamiento.

Para la definición de la dispersión ($\beta_{ds,i}$), si bien el manual HAZUS-MH MR4 sugiere valores genéricos de dispersión, esto en algunos casos llegan a ser valores muy conservadores. Para la presente investigación se adoptan los valores específicos de $\beta=0.40$ para los estados de daño Leve y Moderado y $\beta=0.50$ para los estados de daño Severo y Colapso.

Estos valores fueron justificados por la aplicación directa de la ecuación de combinación de incertidumbres de la demanda (β_D), de la capacidad (β_C) y el modelo (β_M).

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_D^2 + \beta_C^2 + \beta_M^2} \quad (Ec. 6)$$

3.6.5. Probabilidades discretas de daño

Una vez obtenidas las probabilidades acumuladas de excedencia ($P(DS \geq ds_i | \delta)$), resulta necesario determinar la probabilidad discreta de daño en la cual se encuentra la estructura tras un evento sísmico. Esto permite cuantificar el escenario más probable de la estructura.

La probabilidad discreta se calcula mediante la siguiente formulación:

$$P(DS = ds_i|\delta) = P(DS \geq ds_i|\delta) - P(DS \geq ds_{i+1}|\delta) \quad (Ec. 7)$$

3.7. Análisis de datos

El análisis se centrará en dos niveles:

- Curvas de capacidad y desempeño estructural:

Interpretación de la curva de capacidad (rigidez inicial, punto de fluencia, degradación y capacidad última) y del punto de desempeño obtenido por intersección capacidad-demanda.

- Curvas de fragilidad y probabilidades de daño:

Con las $\theta_{ds,i}$ y $\beta_{ds,i}$ se evaluará $P(DS \geq ds_i|\delta)$ (probabilidad acumulada de excedencia). Las probabilidades discretas por estado de daño se obtienen por diferenciación de las acumuladas, como establece HAZUS-MH MR4.

Finalmente, los resultados del análisis se contrastarán con los objetivos específicos de la investigación, destacando patrones y relaciones significativas que permitan validar y/o refutar las hipótesis planteadas.

3.8. Consideraciones éticas

Esta investigación se llevó a cabo respetando los principios éticos aplicables a los estudios académicos, garantizando la integridad científica y la responsabilidad en el uso de las metodologías y resultados. Se aseguró que los procedimientos fueron realizados con rigor técnico, utilizando fuentes confiables y métodos validados que eviten cualquier tipo de manipulación o distorsión de los datos analizados.

En el análisis y presentación de resultados, se buscó promover la objetividad y transparencia, asegurando que las conclusiones estén fundamentadas en los hallazgos obtenidos y no en interpretaciones subjetivas. Se hizo énfasis en la relevancia de los resultados para mejorar la seguridad estructural de las edificaciones y contribuir al bienestar social, evitando cualquier conflicto de intereses o prejuicio en las recomendaciones finales.

Finalmente, la investigación se llevó a cabo considerando la responsabilidad social, enfocándose en la generación de nuevos datos que contribuya al diseño sismorresistente y a la mitigación de riesgos en edificaciones en zonas sísmicamente activas como Lima.

IV. RESULTADOS

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología a los dos modelos estructurales evaluados. A continuación, se detallan los hallazgos correspondientes a la capacidad de deformación de los sistemas, la evaluación del punto de desempeño frente a distintos niveles de sismicidad y las curvas de fragilidad para cada dirección de análisis.

4.1. Capacidad de deformación y definición de estados de daño

Con el objetivo de realizar una evaluación comparativa de ambos tipos de reforzamiento, se optó por tener valores idénticos de dispersión (β) con el fin de aislar la variable de capacidad física del material.

La Tabla 4 y Tabla 5 presenta el resumen de los valores de la mediana (θ_{ds}) y la dispersión (β_{ds}) adoptados para la generación de las curvas para ambos tipos de reforzamiento.

Tabla 4

Parámetros estadísticos de las curvas de fragilidad del escenario MDL-EW

	1	2	3	4
Estado de Daño	DS1: Leve	DS2: Moderado	DS3: Severo	DS4: Colapso
θ_{ds}	0.10%	0.25%	0.35%	0.50%
β_{ds}	0.40	0.40	0.50	0.50

Tabla 5

Parámetros estadísticos de las curvas de fragilidad del escenario MDL-DB

	1	2	3	4
Estado de	DS1: Leve	DS2: Moderado	DS3: Severo	DS4: Colapso

Daño				
θ_{ds}	0.15%	0.40%	0.65%	0.70%
β_{ds}	0.40	0.40	0.50	0.50

4.2. Evaluación del punto de desempeño y derivas máximas

Mediante la aplicación del Método del Linealización Equivalente propuesto en el documento FEMA 440, se determinó el punto de desempeño para cada uno de los modelos estructurales bajo los cuatro niveles de amenaza sísmica evaluados.

A partir de la intersección de la curva de capacidad con el espectro de demanda, se obtuvieron los desplazamientos espectrales que fueron transformados a derivas de entrepiso.

A continuación, la Tabla 6 y la Tabla 7 resumen estos resultados para cada tipo de reforzamiento.

Tabla 6

*Respuesta estructural en el punto de desempeño para distintos niveles de amenaza sísmica
(Escenario MDL-EW)*

Dirección	Parámetros	Sismo	Sismo	Sismo Raro	Sismo Muy
		Frecuente	Ocasional	(Diseño	Raro
patrón	de	(Sismo	(Servicio	475 años)	(Máximo
pushover	respuesta	45 años)	75 años)		970 años)
XX	Punto de				
	desempeño	0.004063	0.005243	0.019869	0.0263
	(m)				
	Cortante	313.7813	357.5332	986.0202	1187.6069
	(ton)				
	Deriva	0.000382	0.000517	0.00187	0.002482

	Deriva %	0.0382	0.0517	0.187	0.2482
	Punto de desempeño (m)	0.003856	0.005395	0.018277	0.026402
YY+	Cortante (ton)	297.478	383.9719	807.8595	992.3805
	Deriva	0.000447	0.000625	0.002034	0.002861
	Deriva %	0.0447	0.0625	0.2034	0.2861
	Punto de desempeño (m)	0.004024	0.005353	0.016779	0.021527
YY-	Cortante (ton)	306.4244	380.9931	762.7442	878.8752
	Deriva	0.00045	0.000628	0.00186	0.002344
	Deriva %	0.045	0.0628	0.186	0.2344
	Punto de desempeño (m)	0.004024	0.005353	0.016779	0.021527

Tabla 7

Respuesta estructural en el punto de desempeño para distintos niveles de amenaza sísmica

(Escenario MDL-DB)

Dirección patrón pushover	Parámetros de respuesta	Sismo Frecuente	Sismo Ocasional	Sismo Raro	Sismo Muy Raro
		(Sismo 45 años)	(Servicio 75 años)	(Diseño 475 años)	(Máximo 970 años)
XX	Punto de desempeño	0.004042	0.005257	0.020631	0.026873

	(m)				
	Cortante				
	(ton)	311.1768	353.7215	993.0431	1177.9142
	Deriva	0.000382	0.000516	0.00187	0.002477
	Deriva %	0.0382	0.0516	0.187	0.2477
YY+	Punto de				
	desempeño	0.003848	0.00539	0.018246	0.027292
	(m)				
	Cortante				
	(ton)	295.678	380.7006	777.7652	971.0674
	Deriva	0.000448	0.000627	0.002045	0.00288
	Deriva %	0.0448	0.0627	0.2045	0.288
YY-	Punto de				
	desempeño	0.004024	0.005345	0.017195	0.022674
	(m)				
	Cortante				
	(ton)	306.4244	377.5964	751.7262	878.5537
	Deriva	0.00045	0.000629	0.001853	0.002379
	Deriva %	0.045	0.0629	0.1853	0.2379

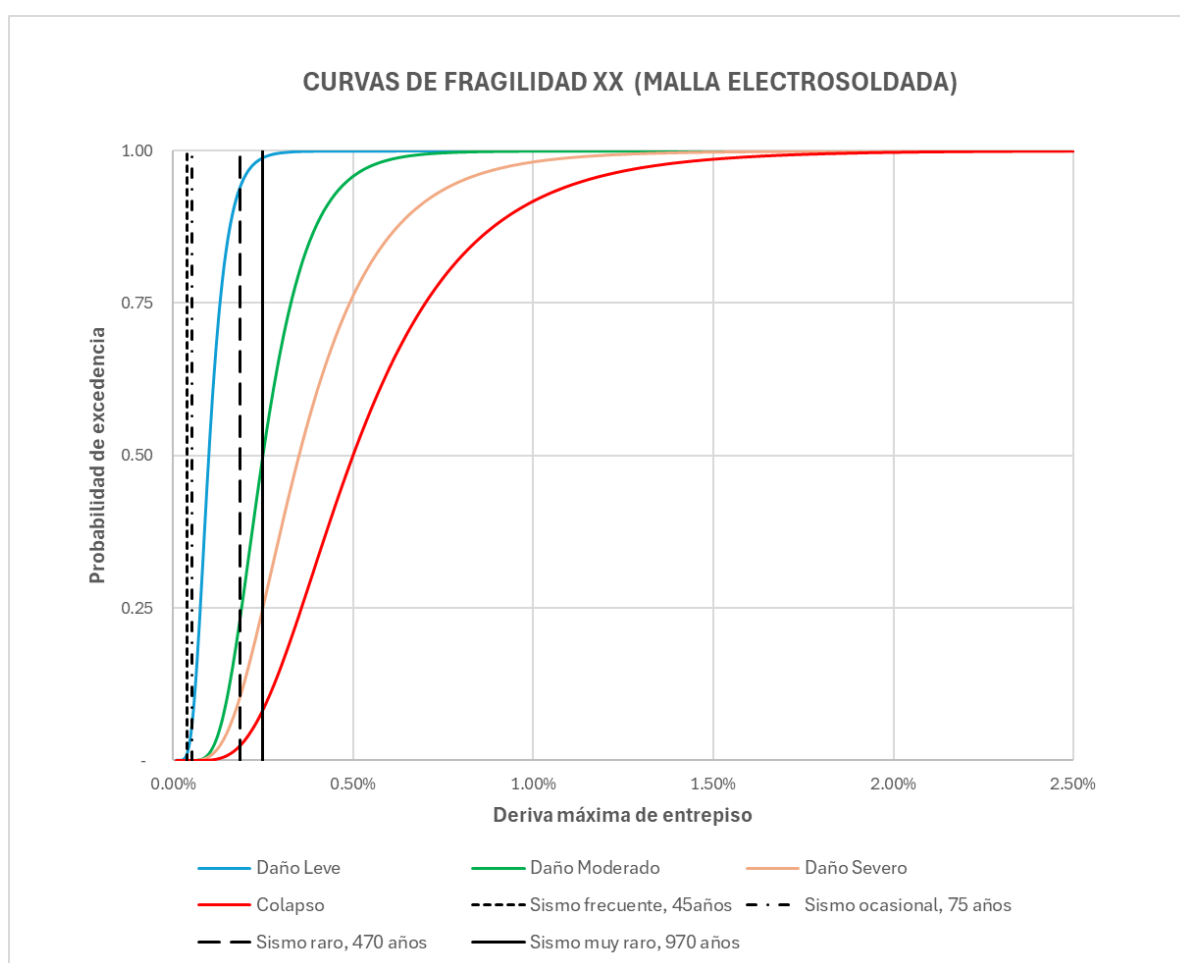
4.3. Curvas de fragilidad

4.3.1. Dirección longitudinal XX

4.3.1.1. Escenario 1 (MDL-EW). En la Figura 20 se presentan las curvas de fragilidad para el muro reforzado con malla electrosoldada en la dirección X. Se evaluaron cuatro estados de daño (Leve, Moderado, Severo y Colapso).

Figura 20

Curvas de fragilidad del escenario MDL-EW en la dirección XX



Sobre las curvas de fragilidad se han trazado líneas verticales que representan la demanda de deriva máxima obtenida para los cuatro niveles de amenaza sísmica evaluados (ver Tabla 6). La intersección de estas líneas verticales con las curvas de fragilidad permite cuantificar la probabilidad de alcanzar o exceder cada estado de daño.

A continuación, la Tabla 8 resume las probabilidades de excedencia calculadas para el

sistema de MDL con malla electrosoldada.

Tabla 8

Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección XX

Amenaza sísmica	Demanda de deriva (δ)	$P(DS \geq ds_i \delta)$			
		Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente (45 años)	0.0382%	0.01	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.0517%	0.04	0	0	0
Raro (470 años)	0.1870%	0.94	0.25	0.11	0.03
Muy raro (970 años)	0.2482%	0.99	0.50	0.25	0.09

Una vez determinadas las probabilidades de excedencia, se obtuvo la probabilidad discreta de daño. Estos resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9

Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección XX

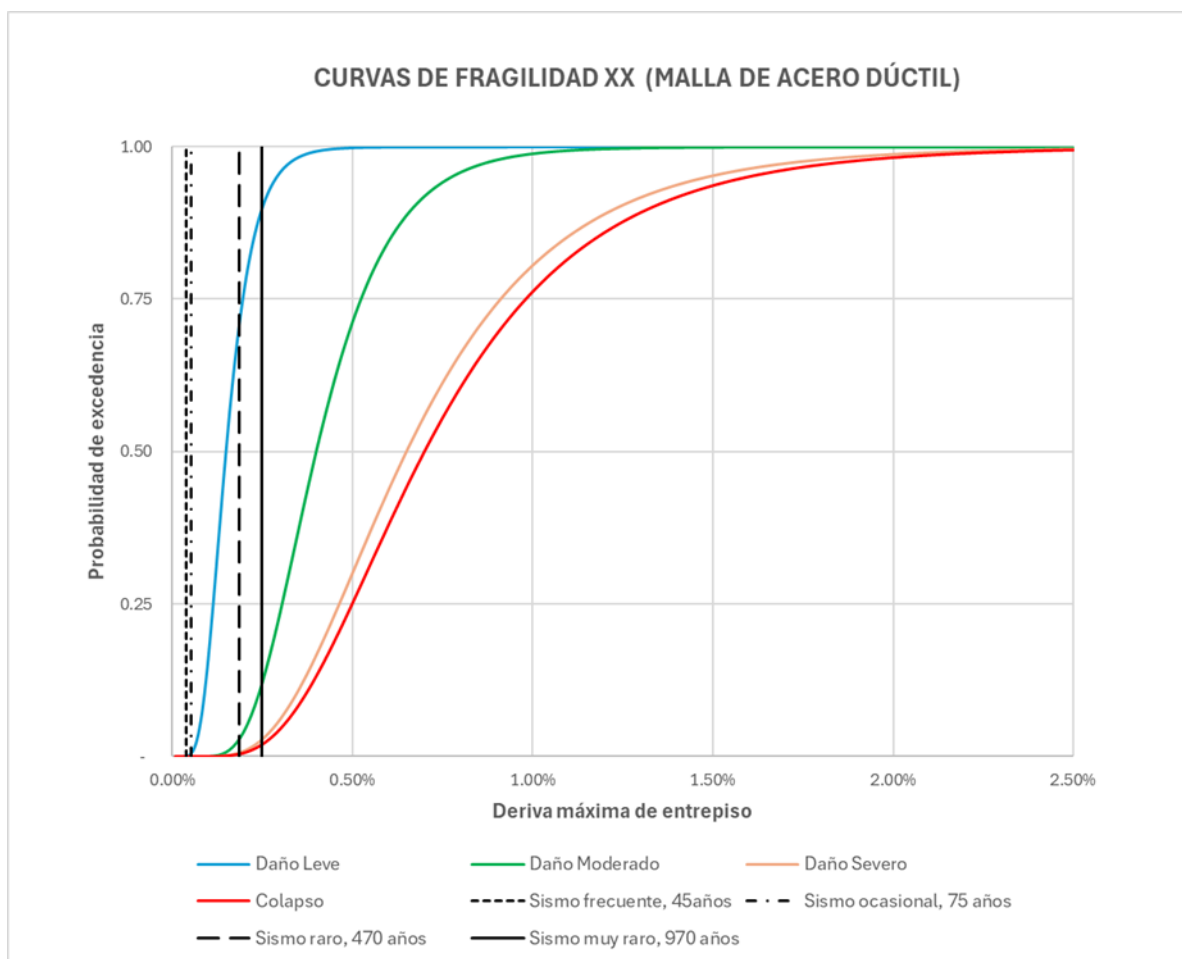
Amenaza sísmica	$P(DS = ds_i \delta)$				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente	0.99	0.01	0	0	0

(45 años)					
Ocasional	0.96	0.04	0	0	0
(75 años)					
Raro	0.06	0.69	0.14	0.08	0.03
(470 años)					
Muy raro	0.01	0.49	0.25	0.16	0.09
(970 años)					

4.3.1.2. Escenario 2 (MDL-DB). En la Figura 21 se presentan las curvas de fragilidad para el muro reforzado con malla de acero dúctil en la dirección XX bajo las mismas condiciones sísmicas que el Escenario 1.

Figura 21

Curvas de fragilidad del escenario MDL-DB en la dirección XX



Sobre las curvas de fragilidad se han trazado líneas verticales que representan la demanda de deriva máxima obtenida para los cuatro niveles de amenaza sísmica evaluados (ver Tabla 7). La intersección de estas líneas verticales con las curvas de fragilidad permite cuantificar la probabilidad de alcanzar o exceder cada estado de daño.

A continuación, la Tabla 10 resume las probabilidades de excedencia calculadas para el sistema de MDL con malla de acero dúctil.

Tabla 10

Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección XX

Amenaza sísmica	Demanda de deriva (δ)	$P(DS \geq ds_i \delta)$			
		Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente (45 años)	0.0382%	0	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.0516%	0.01	0	0	0
Raro (470 años)	0.1870%	0.71	0.035	0.01	0.01
Muy raro (970 años)	0.2477%	0.89	0.12	0.03	0.02

Una vez determinadas las probabilidades de excedencia, se obtuvo la probabilidad discreta de daño. Estos resultados se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección XX

Amenaza sísmica	$P(DS = ds_i \delta)$				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente (45 años)	1.00	0	0	0	0

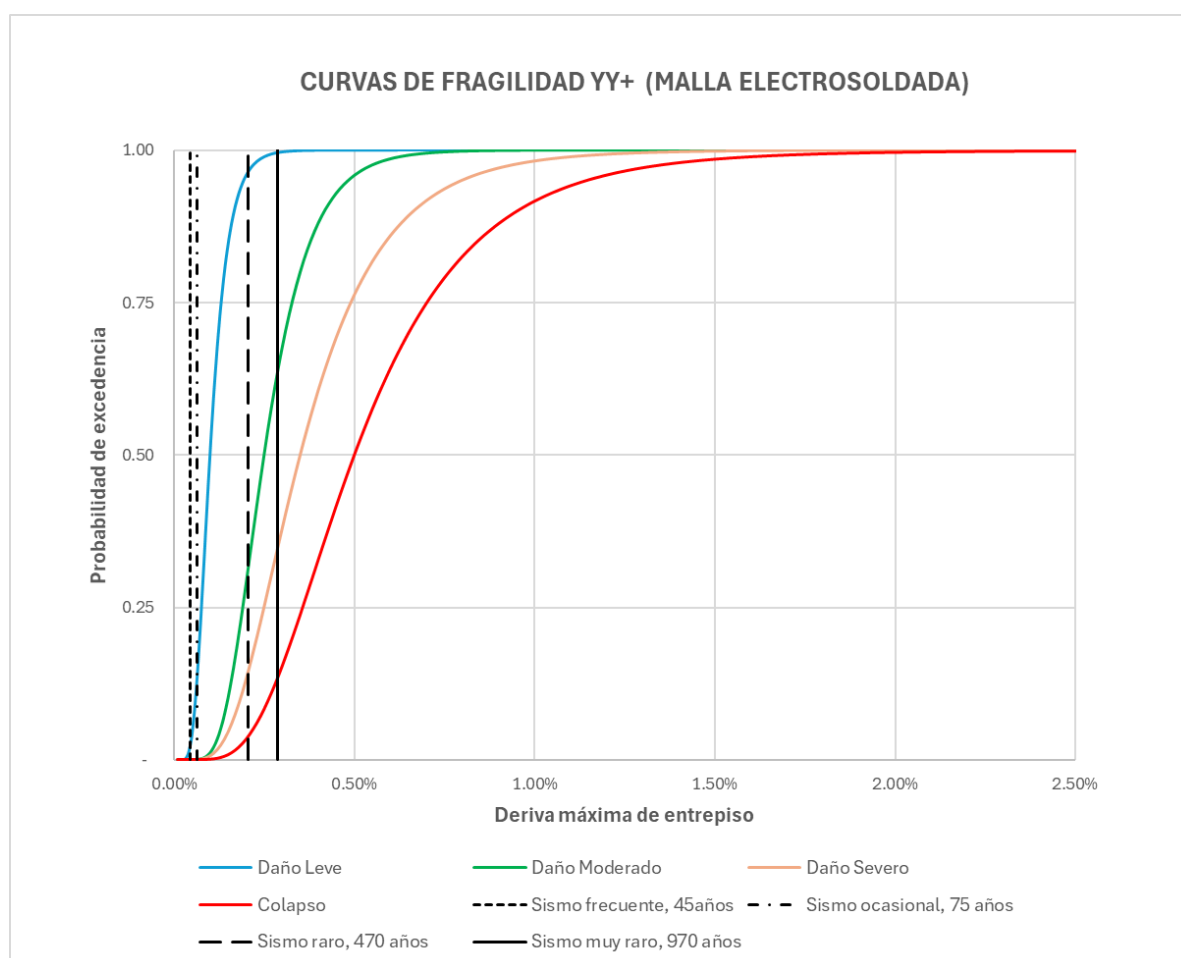
Ocasional (75 años)	0.99	0.01	0	0	0
Raro (470 años)	0.29	0.675	0.025	0	0.01
Muy raro (970 años)	0.11	0.77	0.09	0.01	0.02

4.3.2. Dirección transversal YY+

4.3.2.1. Escenario 1 (MDL-EW). En la Figura 22 se presentan las curvas de fragilidad para el muro reforzado con malla electrosoldada en la dirección YY+.

Figura 22

Curvas de fragilidad del escenario MDL-EW en la dirección YY+



A continuación, la Tabla 12 resume las probabilidades de excedencia calculadas para el sistema de MDL con malla electrosoldada.

Tabla 12

Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección YY+

Amenaza sísmica	Demanda de deriva (δ)	$P(DS \geq ds_i \delta)$			
		Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente (45 años)	0.0447%	0.01	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.0625%	0.10	0	0	0
Raro (470 años)	0.2034%	0.97	0.32	0.15	0.04
Muy raro (970 años)	0.2861%	1.00	0.63	0.36	0.14

Una vez determinadas las probabilidades de excedencia, se obtuvo la probabilidad discreta de daño. Estos resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13

Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección YY+

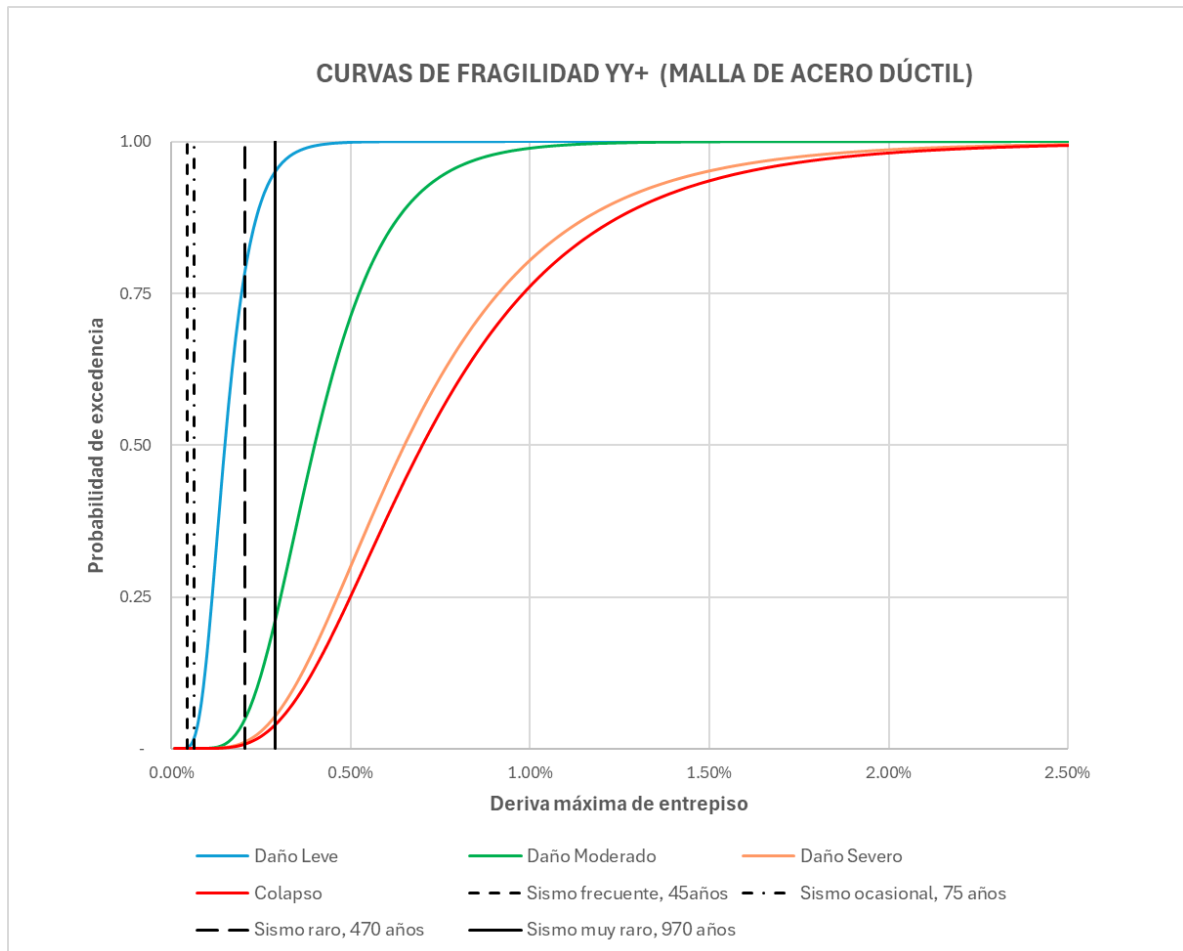
Amenaza sísmica	$P(DS = ds_i \delta)$				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso

Frecuente (45 años)	0.99	0.01	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.90	0.10	0	0	0
Raro (470 años)	0.03	0.65	0.17	0.11	0.04
Muy raro (970 años)	0	0.37	0.27	0.22	0.14

4.3.2.2. Escenario 2 (MDL-DB). En la Figura 23 se presentan las curvas de fragilidad para el muro reforzado con malla de acero dúctil en la dirección YY+ bajo las mismas condiciones sísmicas que el Escenario 1.

Figura 23

Curvas de fragilidad del escenario MDL-DB en la dirección YY+



A continuación, la Tabla 14 resume las probabilidades de excedencia calculadas para el sistema de MDL con malla de acero dúctil.

Tabla 14

Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección YY+

Amenaza	Demanda	$P(DS \geq ds_i \delta)$
---------	---------	----------------------------

sísmica	de deriva	Leve	Moderado	Severo	Colapso
	(δ)				
Frecuente (45 años)	0.0448%	0	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.0627%	0.01	0	0	0
Raro (470 años)	0.2045%	0.78	0.05	0.01	0.01
Muy raro (970 años)	0.2880%	0.95	0.21	0.055	0.04

Una vez determinadas las probabilidades de excedencia, se obtuvo la probabilidad discreta de daño. Estos resultados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15

Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección YY+

Amenaza	$P(DS = ds_i \delta)$				
sísmica	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente (45 años)	1.00	0	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.99	0.01	0	0	0
Raro (470 años)	0.22	0.73	0.04	0	0.01

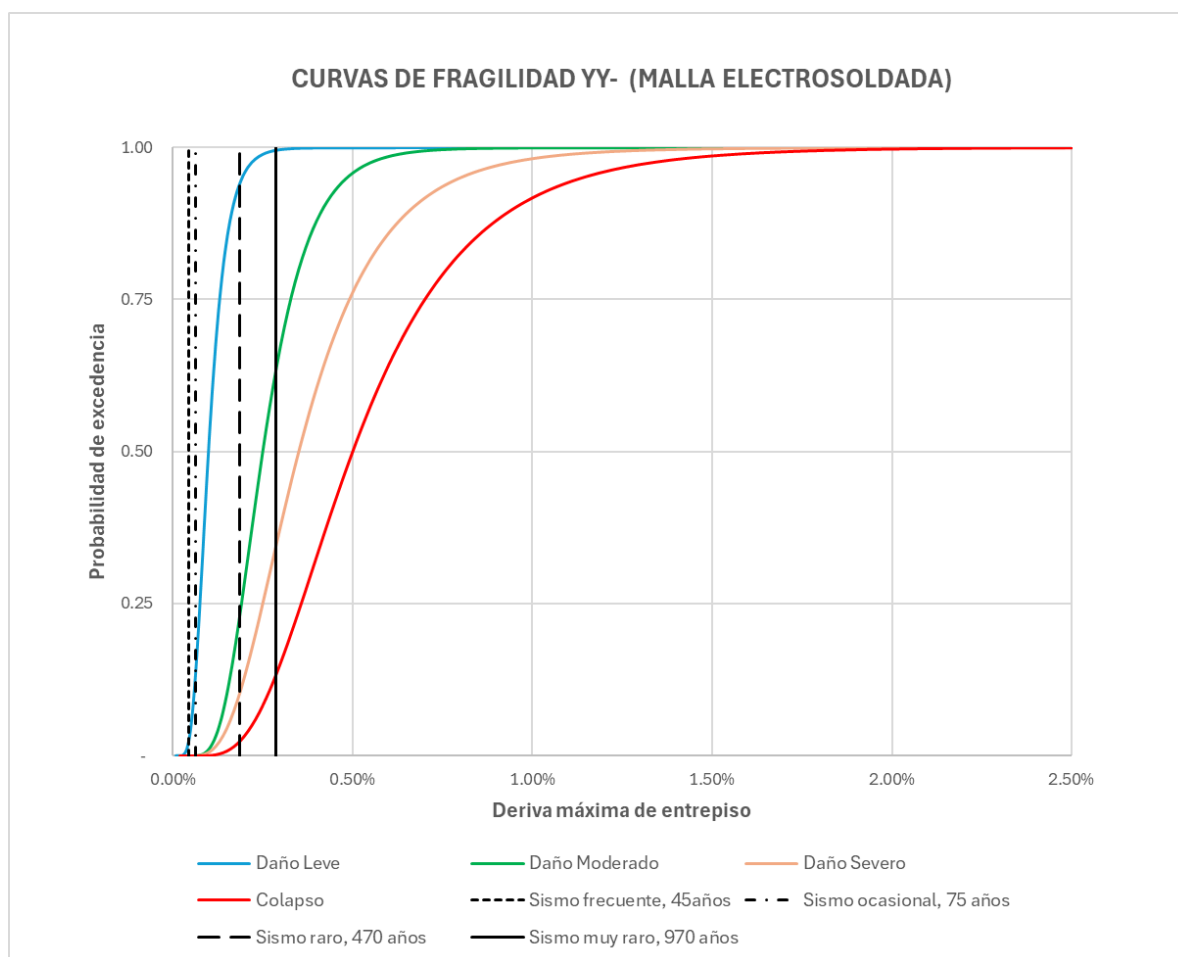
Muy raro					
(970 años)	0.05	0.74	0.155	0.015	0.04

4.3.3. Dirección transversal YY-

4.3.3.1. Escenario 1 (MDL-EW). En la Figura 24 se presentan las curvas de fragilidad para el muro reforzado con malla electrosoldada en la dirección YY-.

Figura 24

Curvas de fragilidad del escenario MDL-EW en la dirección YY-



A continuación, la Tabla 16 resume las probabilidades de excedencia calculadas para el sistema de MDL con malla electrosoldada.

Tabla 16

Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección YY-

Amenaza sísmica	Demanda de deriva (δ)	$P(DS \geq ds_i \delta)$			
		Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente (45 años)	0.0450%	0.01	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.0628%	0.15	0	0	0
Raro (470 años)	0.1860%	0.945	0.25	0.105	0.025
Muy raro (970 años)	0.2344%	1	0.62	0.345	0.13

Una vez determinadas las probabilidades de excedencia, se obtuvo la probabilidad discreta de daño. Estos resultados se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17

Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-EW en la dirección YY-

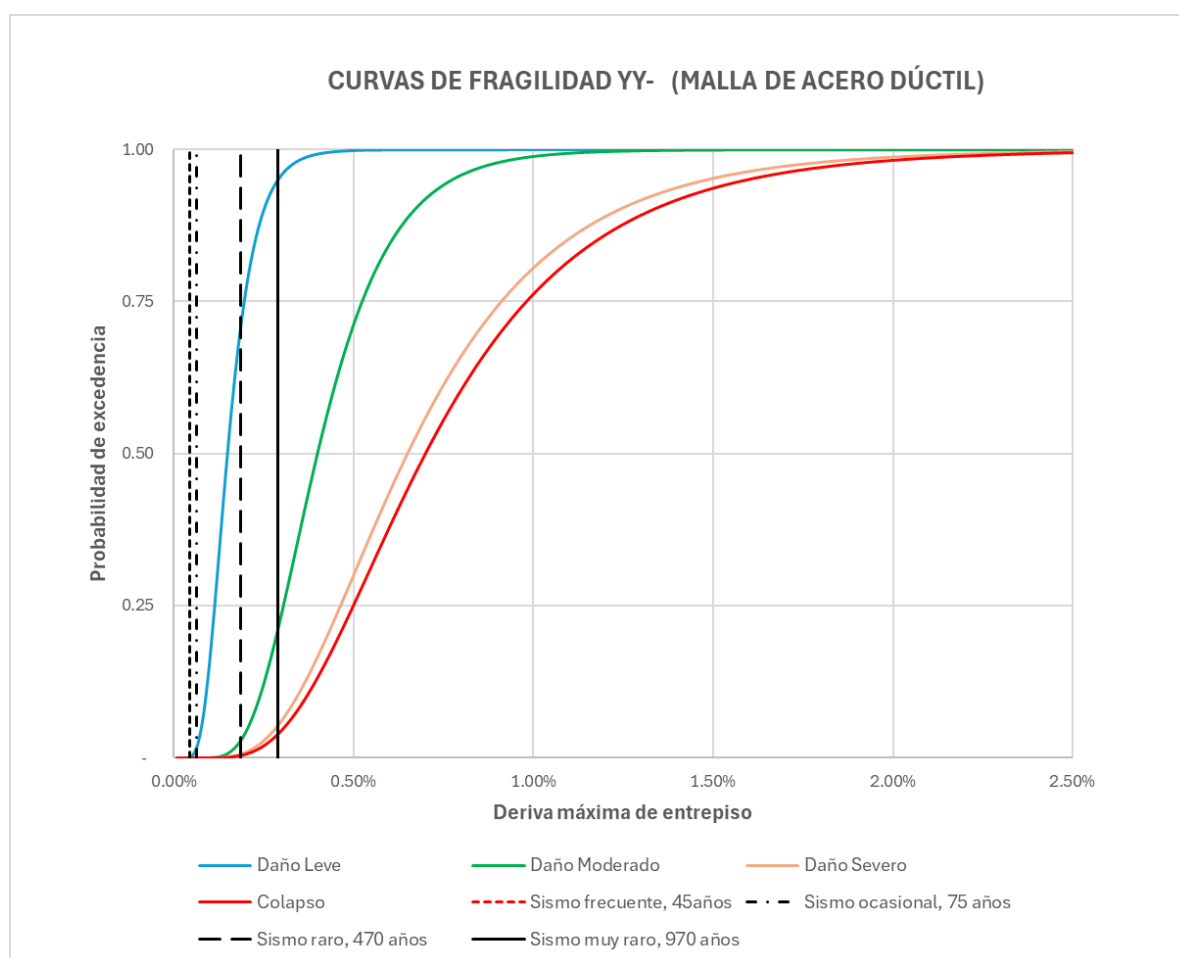
Amenaza sísmica	$P(DS = ds_i \delta)$				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente (45 años)	0.99	0.01	0	0	0

Ocasional (75 años)	0.85	0.15	0	0	0
Raro (470 años)	0.055	0.695	0.145	0.08	0.025
Muy raro (970 años)	0	0.38	0.275	0.215	0.13

4.3.3.2. Escenario 2 (MDL-DB). En la Figura 25 se presentan las curvas de fragilidad para el muro reforzado con malla de acero dúctil en la dirección YY- bajo las mismas condiciones sísmicas que el Escenario 1.

Figura 25

Curvas de fragilidad del escenario MDL-DB en la dirección YY-



A continuación, la Tabla 18 resume las probabilidades de excedencia calculadas para el sistema de MDL con malla de acero dúctil.

Tabla 18

Probabilidad de excedencia de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección YY-

Amenaza sísmica	Demanda de deriva (δ)	$P(DS \geq ds_i \delta)$			
		Leve	Moderado	Severo	Colapso
Frecuente (45 años)	0.0450%	0	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.0629%	0.015	0	0	0
Raro (470 años)	0.1853%	0.71	0.03	0.005	0.005
Muy raro (970 años)	0.2379%	0.95	0.21	0.055	0.035

Una vez determinadas las probabilidades de excedencia, se obtuvo la probabilidad discreta de daño. Estos resultados se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Probabilidad discreta de daño por nivel de amenaza sísmica del escenario MDL-DB en la dirección YY-

Amenaza sísmica	$P(DS = ds_i \delta)$				
	Sin daño	Leve	Moderado	Severo	Colapso

Frecuente (45 años)	1.00	0	0	0	0
Ocasional (75 años)	0.985	0.015	0	0	0
Raro (470 años)	0.29	0.68	0.025	0	0.005
Muy raro (970 años)	0.05	0.74	0.155	0.02	0.035

Finalmente, la Tabla 20 resume los resultados de la evaluación de daño para el escenario 1 (EW) y escenario 2 (DB) para las direcciones XX, YY+ y YY-.

Tabla 20 *Resumen de resultados*

Dirección	Nivel de amenaza	Probabilidad discreta de daño	Escenario 1: MDL-EW	Escenario 2: MDL-DB
XX	Frecuente	Sin daño	99%	100%
		Leve	1%	0%
		Moderado	0%	0%
		Severo	0%	0%
		Colapso	0%	0%
	Ocasional	Sin daño	96%	99%
		Leve	4%	1%
		Moderado	0%	0%
		Severo	0%	0%
		Colapso	0%	0%

	Raro	Sin daño	6%	29%
		Leve	69%	67.5%
		Moderado	14%	2.5%
		Severo	8%	0%
		Colapso	3%	1%
	Muy raro	Sin daño	1%	11%
		Leve	49%	77%
		Moderado	25%	9%
		Severo	16%	1%
		Colapso	9%	2%
YY+	Frecuente	Sin daño	99%	100%
		Leve	1%	0%
		Moderado	0%	0%
		Severo	0%	0%
		Colapso	0%	0%
	Ocasional	Sin daño	90%	99%
		Leve	10%	1%
		Moderado	0%	0%
		Severo	0%	0%
		Colapso	0%	0%
	Raro	Sin daño	3%	22%
		Leve	65%	73%
		Moderado	17%	4%
		Severo	11%	0%

		Colapso	4%	1%
	Muy raro	Sin daño	0%	5%
		Leve	37%	74%
		Moderado	27%	15.5%
		Severo	22%	1.5%
		Colapso	14%	4%
YY-	Frecuente	Sin daño	99%	100%
		Leve	1%	0%
		Moderado	0%	0%
		Severo	0%	0%
		Colapso	0%	0%
	Ocasional	Sin daño	85%	98.5%
		Leve	15%	1.5%
		Moderado	0%	0%
		Severo	0%	0%
		Colapso	0%	0%
	Raro	Sin daño	5.5%	29%
		Leve	69.5%	68%
		Moderado	14.5%	2.5%
		Severo	8%	0%
		Colapso	2.5%	0.5%
	Muy raro	Sin daño	0%	5%
		Leve	38%	74%
		Moderado	27.5%	15.5%

Severo	21.5%	2%
Colapso	13%	3.5%

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo, se contrastan los hallazgos obtenidos en la evaluación de la fragilidad sísmica, capacidad de deformación y respuesta sísmica del sistema de muros de ductilidad limitada para los dos casos de estudio. A través de este análisis comparativo con las investigaciones de San Bartolomé et al. (2003), Zavala (2004), Arroyo et al. (2021), L. G. Quiroz y Maruyama (2014), entre otros, se busca validar el impacto del uso de la malla de acero dúctil frente a la malla electrosoldada ante distintos niveles de amenaza sísmica.

5.1. Comparación de capacidad de deformación y definición de estados de daño

La definición de los estados de daño, basado en evidencia experimental recopilada de Carrillo et al. (2012) y SENCICO y LEDI – PUCP (2016), permitió establecer una diferencia significativa en la capacidad de deformación entre ambos tipos de reforzamiento.

En la Tabla 4, se observa que el sistema de MDL con malla electrosoldada presenta umbrales de daño mucho más restrictivos, por ejemplo, el inicio del daño leve (DS1) ocurre a una deriva de 1‰ y el colapso (DS4) se define a los 5‰. Esta limitación es congruente con lo reportado por San Bartolomé et al. (2003), quienes advierten que la falta de plataforma de fluencia en la malla electrosoldada precipita una ruptura frágil de los alambres apenas supera el rango elástico.

Por el contrario, la Tabla 5 muestra que el uso de malla de acero dúctil incrementa notablemente estos umbrales, retrasando el inicio del daño leve a una deriva de 1.5‰ y elevando el límite de colapso hasta 7‰. Esta diferencia de 2‰ en la capacidad de deformación última corrobora con lo estipulado por Arroyo et al. (2021) y L. G. Quiroz y Maruyama (2014), confirmando que la ductilidad del acero dúctil influye en la capacidad del sistema para tolerar mayores desplazamientos y deformaciones antes de alcanzar la falla teórica y retarda la aparición de fisuras iniciales visibles, ventajas que el refuerzo electrosoldado no posee.

5.2. Respuesta sísmica (derivadas)

La evaluación del punto de desempeño para cada nivel de amenaza sísmica mediante el Método de Linealización Equivalente revela que las derivadas son similares en ambos sistemas. Por ejemplo, para el sismo raro (475 años) en la dirección XX, el sistema MDL-EW presentó una derivada de 1.87‰, idéntica a la del sistema MDL-DB.

Este comportamiento es consistente con lo observado en los modelos analíticos de L. G. Quiroz y Maruyama (2014) y en los ensayos de Zavala (2004), donde se determinó que, en rangos de deformación baja y moderada, la rigidez lateral depende más de la geometría del muro y la calidad del concreto que del tipo de acero de refuerzo. Por lo tanto, el tipo de refuerzo (electrosoldado vs dúctil) no altera significativamente la rigidez elástica inicial, sino que su impacto es crítico en la capacidad de deformación última, como se discute a continuación.

5.3. Análisis comparativo de la fragilidad sísmica

Para sismos frecuentes y ocasionales, ambos sistemas (MDL-EW y MDL-DB) concentran la mayor probabilidad en los estados “Sin daño” o “Daño leve” para ambas direcciones. Esto significa que la influencia del tipo de acero es despreciable, ya que la estructura opera fundamentalmente en el rango elástico o presenta leve inicio de agrietamiento. Estos resultados ratifican lo expuesto por Silva et al. (2014) sobre la similitud de respuesta en los estados de límite inferiores, y concuerdan con San Bartolomé et al. (2003), quienes observaron que ambos sistemas tienen un sistema de desempeño similar hasta alcanzar desplazamiento de aproximadamente 12.5mm.

Para sismos raros y muy raros, las diferencias en la respuesta se hacen evidentes. Los datos confirman que el sistema reforzado con malla de acero dúctil logra mitigar la probabilidad de daño irreparable.

Para la dirección XX bajo la amenaza sísmica “rara”, el sistema MDL-EW presenta solo un 6% de probabilidad de quedar intacto. La mayor probabilidad se concentra en daño

leve (69%), seguido por un 14% de daño moderado, existiendo aún un riesgo combinado del 11% de sufrir daño severo (8%) o colapso (3%). En contraste, el sistema MDL-DB presenta una probabilidad de quedar intacto sube al 29% y el daño moderado se reduce al 2.5%. Resulta relevante que la probabilidad de daño severo es nula (0%) y la de colapso es apenas del 1%.

Para la dirección YY+ bajo la amenaza sísmica “rara”, el sistema MDL-EW presenta solo un 3% de probabilidad de quedar intacto. La mayor probabilidad se concentra en daño leve (65%), seguido por un 17% de daño moderado, existiendo aún un riesgo combinado del 15% de sufrir daño severo (11%) o colapso (4%). En contraste, el sistema MDL-DB presenta una probabilidad de quedar intacto sube al 22% y el daño moderado se reduce al 4%. Resulta relevante que la probabilidad de daño severo es nula (0%) y la de colapso es apenas del 1%.

Para la dirección YY- bajo la amenaza sísmica “rara”, el sistema MDL-EW presenta solo un 5.5% de probabilidad de quedar intacto. La mayor probabilidad se concentra en daño leve (69.5%), seguido por un 14.5% de daño moderado, existiendo aún un riesgo combinado del 10.5% de sufrir de daño severo (8%) o colapso (2.5%). En contraste, el sistema MDL-DB presenta una probabilidad de quedar intacto sube al 29% y el daño moderado se reduce al 2.5%. Resulta relevante que la probabilidad de daño severo es nula (0%) y la de colapso es apenas del 0.5%.

Para la dirección XX bajo la amenaza sísmica “muy rara”, el sistema MDL-EW presenta solo un 1% de probabilidad de quedar intacto. Aunque una parte significativa de la respuesta se encuentra en daño leve (49%), existe una alta incidencia de daños superiores, un 25% de probabilidad de daño moderado y un riesgo acumulado crítico del 25% de sufrir daño severo (16%) o colapso (9%). En contraste, el sistema MDL-DB la probabilidad de quedar intacto aumenta al 11% y el comportamiento se establece mayoritariamente en daño leve (77%). Lo más relevante es la drástica reducción de los estados críticos, el daño moderado baja al 9%, el severo al 1% y el colapso al 2%, garantizando una mayor seguridad global.

Para la dirección YY+ bajo la amenaza sísmica “muy rara”, el sistema MDL-EW presenta un 0% de probabilidad de quedar intacto. Aunque una parte significativa de la respuesta se encuentra en daño leve (37%), existe una alta incidencia de daños superiores, un 27% de probabilidad de daño moderado y un riesgo acumulado crítico del 36% de sufrir daño severo (22%) o colapso (14%). En contraste, el sistema MDL-DB la probabilidad de quedar intacto aumenta al 5% y el comportamiento se establece mayoritariamente en daño leve (74%). Lo más relevante es la drástica reducción de los estados críticos, el daño moderado baja al 15.5%, el severo al 1.5% y el colapso al 4%, garantizando una mayor seguridad global.

Para la dirección YY- bajo la amenaza sísmica “muy rara”, el sistema MDL-EW presenta un 0% de probabilidad de quedar intacto. Aunque una parte significativa de la respuesta se encuentra en daño leve (38%), existe una alta incidencia de daños superiores, un 27.5% de probabilidad de daño moderado y un riesgo acumulado crítico del 34.5% de sufrir daño severo (21.5%) o colapso (13%). En contraste, el sistema MDL-DB la probabilidad de quedar intacto aumenta al 5% y el comportamiento se establece mayoritariamente en daño leve (74%). Lo más relevante es la drástica reducción de los estados críticos, el daño moderado baja al 15.5%, el severo al 2% y el colapso al 3.5%, garantizando una mayor seguridad global.

Como se pudo observar, la drástica reducción de riesgo confirma la hipótesis planteada por L. G. Quiroz y Maruyama (2014), quienes identificaron un incremento relativo al colapso en muros de malla electrosoldada ante amenazas severas.

VI. CONCLUSIONES

- La evaluación de la fragilidad sísmica determinó que las edificaciones de muros de ductilidad limitada reforzadas con malla de acero dúctil presentan un desempeño sísmico superior en comparación al de aquellas reforzadas con malla electrosoldada convencional. El uso de acero dúctil incrementa significativamente la capacidad de deformación inelástica, reduciendo la probabilidad de daño severo o colapso ante eventos sísmicos de gran magnitud en la zona de Lima.
- Se determinaron umbrales de deriva de entrepiso (drift) relacionados con estados de daño para muros de ductilidad limitada utilizando la literatura existente. Se estableció que el sistema con malla electrosoldada (MDL-EW) tiene una capacidad de deformación restringida, alcanzando el colapso a una deriva de 0.005 debido a la poca elongación del refuerzo antes de su ruptura. En contraste, el sistema con malla de acero dúctil (MDL-DB) permitió extender este límite hasta una deriva de 0.007, validando que la ductilidad del material es el factor clave para tolerar mayores desplazamientos laterales sin pérdida súbita de resistencia.
- La construcción de las curvas de fragilidad demostró una clara diferencia en la fragilidad de ambos sistemas. Las curvas del sistema de malla electrosoldada exhibieron una pendiente pronunciada, lo que indica que pequeños incrementos en la demanda sísmica dispararían rápidamente la probabilidad de daño severo. Por el contrario, las curvas del sistema con acero dúctil fueron más tendidas, reflejando una transición gradual y controlada entre estados de daño, lo que otorgó una mayor reserva de seguridad antes de alcanzar la falla completa.
- La evaluación comparativa confirmó que el sistema de malla de acero dúctil ofreció una mayor confiabilidad estructural. Mientras que las edificaciones de malla electrosoldada mostraron una alta probabilidad de exceder el estado límite de

“prevención de colapso” bajo demandas de diseño, el uso de refuerzo dúctil logró reducir esta probabilidad, garantizando un desempeño más acorde con los objetivos normativos de seguridad de vida y protección de la inversión.

- Los resultados obtenidos en esta investigación ofrecieron una validación probabilística de los parámetros estipulados en la propuesta de actualización de la Norma Técnica E.030 (2025). El análisis de fragilidad ratificó la modificación del coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas a 3.5, debido a que edificaciones con malla electrosoldada presentaron una alta probabilidad de daño severo y de colapso ante demandas de desplazamiento moderadas debido a la baja capacidad de disipación de energía frente al refuerzo convencional. Asimismo, las curvas de fragilidad generadas evidenciaron que, para el sistema del MDL con mallas electrosoldadas, la probabilidad de exceder el estado de daño severo se incrementa exponencialmente una vez superada la deriva del 0.4%. Esto concuerda con la restricción impuesta en la norma que limita la distorsión de entrepiso a 0.004 para este sistema.

VII. RECOMENDACIONES

- Validar las curvas de fragilidad obtenidas mediante el método estático (pushover), realizando un análisis dinámico incremental (IDA), utilizando acelerogramas de sismos peruanos o de zonas de subducción similares, con el fin de poder capturar los efectos de degradación cíclica de rigidez y resistencia.
- Realizar un estudio costo-beneficio que cuantifique el ahorro potencial en reparaciones post-sismo. Dado que el sistema de MDL reforzado con malla de acero dúctil reduce la probabilidad de daño severo ante el sismo de diseño, se puede evaluar si la reducción de pérdidas económicas futuras justifica la inversión inicial adicional del material dúctil frente a la malla electrosoldada.
- Desarrollar un estudio de interacción suelo-estructura (ISE) para evaluar cómo la flexibilidad de los suelos típicos de Lima afecta las curvas de fragilidad de estos sistemas muy rígidos.

VIII. REFERENCIAS

- Al-Rousan, R. Z. (2021). The impact of the welded wire mesh as internal reinforcement on the flexural behavior of RC beams exposed to elevated temperature. *Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00618>
- Applied Technology Council. (1995). *Structural Response Modification Factors*. (Report No. ATC-19).
- Arango, S., Paz, A., y Duque, M. D. P. (2013). Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica (Methodological proposal for the evaluation of the structural behavior of a metallic rack). *Revista ELA*, 6(12), 139. <https://doi.org/10.24050/reia.v6i12.226>
- Araújo, G. (2021). *Seismic Risk Assesment of the Thin and Lightly Reinforced Concrete Wall Building System*. [Tesis de maestría, Universidad del Norte]. Repositorio Institucional UN. <http://hdl.handle.net/10584/9495>
- Arciniegas, A. (2020). *Criterios de aceptación para la evaluación basada en desempeño de los edificios de muros delgados de concreto reforzado en Colombia*. [Tesis de maestría, Universidad del Norte]. Repositorio Institucional UN. <http://hdl.handle.net/10584/9493>
- Arroyo, O., Feliciano, D., Carrillo, J., y Hube, M. A. (2021). Seismic performance of mid-rise thin concrete wall buildings lightly reinforced with deformed bars or welded wire mesh. *Engineering Structures*, 241. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112455>
- Calabrese, A., Almeida, J. P., y Pinho, R. (2010). Numerical issues in distributed inelasticity modeling of RC frame elements for seismic analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 14(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1080/13632461003651869>
- Carrillo, J., y Alcocer, S. M. (2012). Acceptance limits for performance-based seismic design of RC walls for low-rise housing. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*,

- 41(15). <https://doi.org/10.1002/eqe.2186>
- Carrillo, J., Oyarzo-Vera, C., y Blandón, C. (2019). Damage assessment of squat, thin and lightly-reinforced concrete walls by the Park y Ang damage index. *Journal of Building Engineering*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100921>
- Carrillo, J., Rico, A., y Alcocer, S. (2016). Experimental study on the mechanical properties of welded-wire meshes for concrete reinforcement in Mexico City. *Construction and Building Materials*, 127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.011>
- Cotrado, D. (2017). *Elaboración de curvas de fragilidad de muros de ductilidad limitada de 10cm de espesor, basados en ensayos experimentales, periodo 2011-2015*. [Tesis de maestría, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio Institucional UPT. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/413>
- Computers and Structures, Inc [CSI]. (2021). ETABS (Versión 19.1) [Software de computación]. <https://www.csiamerica.com>.
- Díaz, M. (2021). *Informe de la revisión de criterios de diseño de edificaciones con muros de ductilidad limitada*. Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento.
- Erberik, M. A., y Elnashai, A. S. (2006). Loss Estimation Analysis of Flat-Slab Structures. *Natural Hazards Review*, 7(1). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1527-6988\(2006\)7:1\(26\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1527-6988(2006)7:1(26))
- 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 electrosoldadas*. Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento.
- Gao, W. (2018). A comprehensive review on identification of the geomaterial constitutive model using the computational intelligence method. *Advanced Engineering Informatics* (Vol. 38). <https://doi.org/10.1016/j.aei.2018.08.021>
- Gonzales, H. (2010). *Comportamiento sísmico de edificios con muros delgados de hormigón. Aplicación a zonas de alta sismicidad de Perú*. [Tesis doctoral, Universitat

Politécnica de Catalunya]. Repositorio Institucional UPC.

<https://hdl.handle.net/2117/93590>

Gonzales, H., y López-Almansa, F. (2012). Seismic performance of buildings with thin RC bearing walls. *Engineering Structures*, 34.

<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.10.007>

Haindl, M. (2014). *Evaluación del desempeño sísmico de una vivienda de muros de hormigón armado*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile].

Repositorio Institucional UC. <https://doi.org/doi.org/10.7764/tesisUC/ING/16578>

Hognestad, E. (1951). *A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members*. (Engineering Experiment Station Bulletin Series No. 399). University of Illinois.

Lopez, S., y Rodriguez, C. (2018). *Construcción de curvas de fragilidad para viviendas unifamiliares de muros de ductilidad limitada*. [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/12488>

Moreno, R., Pujades, L., Aparicio, A. C., y Barbat, A. (2007). Herramientas necesarias para la evaluación sísmica de edificios (Monografías de Ingeniería Sísmica, IS-59). Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).

Muñoz, A., Delgado, R., y Peña, C. (2010). *Desempeño sismorresistente de edificios de muros de ductilidad limitada*. Revista de La Sección de Ingeniería Civil-PUCP.

Nastri, E., y Pisapia, A. (2025). Performance-Based Seismic Design. *Applied Sciences* 15(5), Artículo 2254.

<https://doi.org/10.3390/app15052254>.

Orakcal, K., Sanchez, L., y Wallace, J. (2006). Analytical Modeling of Reinforced Concrete Walls for Predicting Flexural and Coupled – Shear-Flexural Responses. *Pacific*

- Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California,* Berkeley.
https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/web_peer607_k._orakcal_l._massone_j.wallace.pdf
- Park, R., y Paulay, T. (1975). Reinforced Concrete Structures. *John Wiley and Sons, Inc.*
<https://doi.org/10.1002/9780470172834>
- Quiroz, L. G., y Maruyama, Y. (2014). *Fragility functions and seismic performance of peruvian thin RC wall buildings*. NCEE 2014 - 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering: Frontiers of Earthquake Engineering.
<https://doi.org/10.4231/D3GT5FG28>
- Quiroz, L., y Maruyama, Y. (2014). Effect of electro-welded wire mesh on the seismic vulnerability of thin RC shear walls in Lima, Peru. *Proceedings of the 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering* (pp. 179–186). Center for Urban Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology.
- Rengel, J. (2016). *Desempeño sismorresistente de edificaciones de muros de ductilidad limitada*. [Tesis de maestría, Universidad Central de Venezuela]. Repositorio Institucional UCV.
<http://hdl.handle.net/10872/11136>
- Sáenz, U. (2019). *Vulnerabilidad sísmica en edificaciones esenciales mediante curvas de fragilidad analíticas—edificio administrativo de la Universidad Nacional del Centro del Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional UNCP.
<http://hdl.handle.net/20.500.12894/5268>
- San Bartolomé, A. (2006). *Comportamiento a carga lateral de muros delgados de concreto reforzados con malla electrosoldada y acero dúctil*. Departamento de Ingeniería,

Sección Civil, Pontificia Universidad Católica Del Perú.

San Bartolomé, A., Muñoz, A., Villagarcía, M., y Acuña, C. (2003). *Comportamiento sísmico de placas de concreto reforzadas con mallas electrosoldadas*. SENCICO- PUCP, Pontificia Universidad Católica Del Perú.

Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO]. (2018). *Norma técnica E.030: Diseño Sismorresistente*. Ministerio de Construcción, Vivienda y Saneamiento.

Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción [SENCICO], y Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú [LEDI-PUCP]. (2016). *Servicios de ensayos estructurales para determinar el comportamiento sísmico de muros de ductilidad limitada*.

Silva, V., Crowley, H., Varum, H., Pinho, R., y Sousa, R. (2014). Evaluation of analytical methodologies used to derive vulnerability functions. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43(2). <https://doi.org/10.1002/eqe.2337>

Vargas, Y. F., Pujades, L. G., Barbat, A. H., y Hurtado, J. E. (2013). Incremental Dynamic Analysis and Pushover Analysis of Buildings. A Probabilistic Comparison. In *Computational Methods in Applied Sciences* (Vol. 26, pp. 293–308). https://doi.org/10.1007/978-94-007-5134-7_17

Velazco, D., y Rodriguez, M. (2024). *Estudio de la vulnerabilidad sísmica estructural utilizando curvas de fragilidad en colegios del distrito de La Molina*. [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/29433>

Yáñez, D. (2006). *Análisis de Respuesta sísmica en Edificios tipo túnel, bajo régimen elástico* [Tesis de maestría no publicada]. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Zavala, C. (2004). *Ensayo en muros y vivienda de una sola planta reforzada con malla*

electrosoldada UNICO/FORSA/PRODAC (Reporte de investigación). Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería.

IX. ANEXOS

Anexo A . MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Problema General ¿De qué manera influye el uso de malla de acero dúctil comparado con la malla electrosoldada en la evaluación de la fragilidad sísmica de edificaciones con muros de ductilidad limitada en la ciudad de Lima? Problemas Específicos -¿Cuáles son los estados límite de daño aplicables a edificaciones de muros de ductilidad limitada que permitan correlacionar adecuadamente los PDI con la evidencia experimental y sísmica existente? -¿Cómo se diferencian las curvas de fragilidad sísmica para el sistema con malla de acero dúctil en comparación con la malla electrosoldada, en función de la deriva de entrepiso? -¿Cuál de los dos sistemas de refuerzo, malla de acero dúctil o malla electrosoldada, presenta menor fragilidad y mayor confiabilidad estructural frente a distintos niveles de intensidad sísmica?	Objetivo General Evaluar la influencia del uso de malla de acero dúctil frente a la malla electrosoldada en la fragilidad sísmica de edificaciones con muros de ductilidad limitada (MDL) situadas en la zona sísmica de Lima, mediante análisis estructurales no lineales y probabilísticos. Objetivos Específicos -Identificar los estados límite de daño aplicables a edificaciones de muros de ductilidad limitada, correlacionando los parámetros de demanda ingenieril (PDI) con la evidencia obtenida de ensayos experimentales, modelos numéricos y reportes de daños observados en sismos severos. -Construir las curvas de fragilidad sísmica para ambos sistemas de refuerzo, definiendo la probabilidad de excedencia de los estados de daño en función de la deriva de entrepiso. -Interpretar los resultados comparativos para establecer cuál sistema de refuerzo presenta menor fragilidad y mayor confiabilidad estructural frente a diferentes niveles de intensidad sísmica.	Hipótesis General Las edificaciones con muros de ductilidad limitada reforzados con malla de acero dúctil presentan una menor fragilidad sísmica y una menor probabilidad de daño estructural, en comparación con las edificaciones reforzadas con malla electrosoldada en la zona sísmica de Lima. Hipótesis Específicas -Los estados límites de daño para edificaciones de MDL pueden definirse mediante derivas de entrepiso, permitiendo una correlación entre los modelos numéricos y daños observados en ensayos o sismos pasados. -Las curvas de fragilidad correspondientes a muros con malla de acero dúctil muestran menores probabilidades de alcanzar cada estado de daño en comparación con las curvas obtenidas para muros con malla electrosoldada, ante un mismo escenario. -El sistema de refuerzo con malla de acero dúctil presenta menor fragilidad y mayor confiabilidad estructural que el sistema con malla electrosoldada frente a diferentes niveles de intensidad sísmica.	Variable Independiente Tipo de refuerzo en muros de ductilidad limitada (MDL) Dimensiones Material del refuerzo Propiedades mecánicas del acero Indicadores a) Material del refuerzo -Malla de acero dúctil -Malla electrosoldada b) Propiedades mecánicas del acero -Resistencia a la fluencia (f_y) -Resistencia última (f_u) -Ductilidad del acero Variable Dependiente Fragilidad sísmica Dimensiones Parámetros estadísticos. Probabilidad de daño por estado límite. Desempeño estructural. Indicadores a) Parámetros estadísticos -Mediana (θ) para cada estado de daño. -Desviación estándar logarítmica (β) para cada estado de daño b) Probabilidad de daño por estado límite. -Probabilidad de daño leve -Probabilidad de daño moderado. -Probabilidad de daño severo. -Probabilidad de colapso. c) Desempeño estructural -Intensidad sísmica para alcanzar cada estado de daño. -Deriva de entrepiso en el punto de desempeño	1. Enfoque de investigación: Cuantitativo 2. Tipo de investigación: Aplicado 3. Diseño de la investigación: Experimental (Numérico) 4. Población: Edificaciones con muros de ductilidad limitada en Lima. 5. Muestra: Modelos representativos de edificaciones de 5 pisos con muros de ductilidad limitada, reforzados con malla de acero dúctil y malla electrosoldada. 6. Instrumentos: - ETABS (modelado y análisis pushover) - Excel (cálculo de curvas de fragilidad, θ y β) - Bases de datos experimentales (CISMID, LEDI-PUCP). 7. Técnicas: Modelación numérica, análisis estático no lineal, ajuste lognormal de datos.