

Effect of earthquake sequences on the probability of damage in reinforced concrete frame buildings in Peru

Emersson Baltazar, Aguilar Huamán¹; Emersson Samuel, Aguilar Huamán²; Miguel Angel, Mosqueira Moreno Dr.³; Hermes Roberto Mosqueira Ramírez Dr.⁴

¹Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Cajamarca, Perú. eaguilarh_epg20@unc.edu.pe

²Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Cajamarca, Perú. eaguilarh_epg19@unc.edu.pe

³Universidad Nacional de Cajamarca (UNC). Cajamarca, Perú. mmosqueira@unc.edu.pe

⁴Universidad Nacional de Cajamarca (UNC). Cajamarca, Perú. hmosqueira@unc.edu.pe

Abstract— Peru, exposed to recurrent earthquakes, faces challenges in the structural safety of its buildings due to the aftershocks that follow the main seismic events. In this article, the effect of earthquake sequences on a typical reinforced concrete porticoed building of educational infrastructure in Peru was studied with the objective of estimating the variation in the expected probability of damage. The methodology followed has consisted of the estimation of fragility curves by means of incremental dynamic analysis (IDA) under a series of seven single earthquakes and the effect of seven subsequent earthquakes. To simulate the behavior under the sequence of earthquakes, four incremental initial damage conditions have been established: fully operational (ND), immediate occupancy (IO), life safety (LS) and prevention of collapse (CP); based on the safety limit states of the building estimated by pushover analysis. The demand parameter used was the maximum interstory drift (MID) and the intensity parameter, the maximum ground acceleration (PGA). The obtained fragility curves have been compared to estimate the effects that subsequent earthquakes have on the probability of damage. The results conclude that the sequence of earthquakes increases the probability of expected damage compared to a single earthquake, from 5% to 35% and from 17% to 59% in the X-X and Y-Y directions respectively. This research demonstrates the importance of considering successive earthquakes in seismic analyses and provides a basis for discussion for Peruvian earthquake-resistant regulations.

Keywords— fragility, mainshock, aftershock, damage probability.

Efecto de secuencias de sismos en la probabilidad de daño de edificios porticados de concreto armado en el Perú

Emersson Baltazar, Aguilar Huamán¹; Emersson Samuel, Aguilar Huamán²; Miguel Angel, Mosqueira Moreno Dr.³; Hermes Roberto Mosqueira Ramírez Dr.⁴

¹Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Cajamarca, Perú. eaguilarh_epg20@unc.edu.pe

²Universidad Nacional de Cajamarca (UNC), Cajamarca, Perú. eaguilarh_epg19@unc.edu.pe

³Universidad Nacional de Cajamarca (UNC). Cajamarca, Perú. mmosqueira@unc.edu.pe

⁴Universidad Nacional de Cajamarca (UNC). Cajamarca, Perú. hmosqueira@unc.edu.pe

Resumen– *El Perú, expuesto a sismos recurrentes, enfrenta desafíos en la seguridad estructural de sus edificaciones debido a las réplicas que siguen a los eventos sísmicos principales. En este artículo se estudió el efecto de secuencias de sismos en un edificio porticado de concreto armado típico de infraestructura educativa en el Perú con el objetivo de estimar la variación en la probabilidad de daño esperada. La metodología seguida ha consistido en la estimación de curvas de fragilidad por medio de análisis dinámicos incrementales (IDA) bajo una serie de siete sismos únicos y el efecto de siete sismos posteriores. Para simular el comportamiento bajo la secuencia de sismos se han establecido cuatro condiciones incrementales de daño inicial: totalmente operacional (ND), ocupación inmediata (IO), seguridad de vida (LS) y prevención al colapso (CP); a partir de los estados límite de seguridad del edificio estimados mediante análisis pushover. El parámetro de demanda usado fue la deriva máxima de entrepiso (MID) y el parámetro de intensidad, la aceleración máxima de suelo (PGA). Las curvas de fragilidad obtenidas han sido comparadas para estimar los efectos que los sismos posteriores tienen en la probabilidad de daño. Los resultados concluyen en que la secuencia de sismos incrementa la probabilidad de daño esperado respecto a un sismo único, desde 5% hasta 35% y desde 17% hasta 59% en las direcciones X-X y Y-Y respectivamente. Esta investigación demuestra la importancia de considerar sismos sucesivos en los análisis sísmicos y supone una base de discusión para la normativa peruana sismorresistente.*

Palabras clave: *curvas de fragilidad, sismo principal, sismo posterior, probabilidad de daño.*

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación está basada en la tesis “Sismos sucesivos y su influencia en la estimación de probabilidad de daño por medio curvas de fragilidad para el edificio 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca” del repositorio de la Universidad Nacional de Cajamarca [1].

En esta investigación se determinó el efecto de sismos sucesivos en la probabilidad de daño de un edificio de pórticos de concreto armado. Además, toma como base el estudio del efecto de la incorporación de réplicas en el desempeño sísmico del mismo edificio evaluado en la investigación “Incorporación de réplicas en el desempeño sísmico de los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca” [2].

Los movimientos sísmicos principales suelen ser seguidos por sismos posteriores, también llamado réplicas, que generan daños adicionales en las edificaciones cercanas. Ejemplos históricos incluyen Northridge (1994, Mw=6.7) y Kern County (1952, Mw=7.3) en EE. UU., así como eventos en Tohoku (Japón, 2011), Christchurch (Nueva Zelanda, 2010–2011), Chile (2010, 2014, 2015) y Nepal (2015). En Italia, tras el sismo de agosto de 2016 (Mw=6.1), seguido por dos réplicas en octubre (Mw=5.9 y Mw=6.5), los edificios colapsados aumentaron del 4% al 65%, evidenciando el impacto acumulativo de los sismos. [1]

En general, para evaluar el comportamiento sísmico de infraestructura civil, se realizan análisis de riesgo y desempeño, generalmente considerando un único evento sísmico. Sin embargo, en la realidad, los sismos principales suelen estar seguidos por múltiples réplicas o sismos posteriores, lo que puede generar estimaciones inadecuadas del posible daño si solo se evalúa el comportamiento ante un sismo aislado.

Para abordar esta limitación, en los últimos años se han desarrollado metodologías centradas en el estudio de la vulnerabilidad de edificios dañados, introduciendo el concepto de fragilidad, como la probabilidad de que una edificación experimente cierto estado de daño como función dependiente de la intensidad de movimiento sísmico [1]. Este proceso comprende la simulación del daño causado por el sismo principal y la evaluación de la capacidad estructural restante.

Esta investigación es una de las primeras en abordar el efecto de sismos consecutivos en edificaciones de concreto armado en Perú. Aunque la norma E.030 de Diseño Sismorresistente [3] permite diseñar estructuras con parámetros de resistencia frente a sismos, su enfoque se limita a análisis simplificados y a la consideración de eventos sísmicos individuales. En ese sentido, se ha estudiado el comportamiento estructural de una edificación que se considera esencial cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después de que ocurra sismo severo [3].

Debido a que los registros históricos muestran que los sismos sucesivos incrementan el daño esperado en las edificaciones, en este contexto, este estudio busca contribuir con fundamentos teóricos que demuestran su importancia en el análisis estructural y fomentan el desarrollo continuo de la normativa sismorresistente. Así, se pretende mejorar la seguridad estructural de las edificaciones, y tener datos más reales para desarrollar mejores planes de prevención y respuesta ante eventos sísmicos.

II. MARCO REFERENCIAL

Diferentes investigaciones han estudiado el efecto de las secuencias de sismos en edificaciones de concreto armado mediante un rango de estados de daño potenciales. En [4] se estudió cómo las réplicas aumentan significativamente el daño acumulado en una estructura, se demostró que el desplazamiento residual tras un fuerte sismo principal se convierte en el nuevo punto de referencia para los sismos posteriores, lo que debe ser considerado en los cálculos de su parámetro de demanda.

Por otro lado, en [5] se estudió el efecto de las secuencias sísmicas en pórticos de concreto reforzados ordinarios reforzados con polímeros de fibra (FRP). Se evidenció que, aunque el refuerzo mejoró la capacidad de colapso, las reducciones de capacidad debido al daño inicial del sismo principal son resultado de los mecanismos plásticos inherentes de la estructura cargados por las secuencias de sismos. En [6] se propuso un marco para evaluar la vulnerabilidad de las estructuras ante secuencias sísmicas, destacando cómo las réplicas incrementan el daño adicional de esta, especialmente cuando la fragilidad del sismo principal varía entre el 30% y el 60%.

En conjunto, estas investigaciones resaltan la importancia de considerar no solo el daño del sismo principal, sino también la influencia de los sismos posteriores en la evaluación del comportamiento sísmico de las edificaciones.

Definiciones:

- 1) *PGA*: aceleración máxima del suelo.
- 2) *IDA*: análisis dinámico incremental.
- 3) *MID*: deriva máxima de entrepiso.
- 4) *Sismo principal*: sismo inicial con mayor intensidad que los sismos posteriores y que supone el inicio de las cargas sísmicas sobre una edificación. [2]
- 5) *Sismo posterior*: sismo de menor intensidad ocurrido después de un sismo principal, también denominado réplica. [2]
- 6) *Secuencia de sismos*: ocurrencia de sismo principal y sismo posterior. [4]
- 7) *Curva de fragilidad*: probabilidad de que un sistema alcance un nivel de daño dado una intensidad sísmica. [6]

- 8) *Pushover*: análisis estático no lineal. [2]
- 9) *Mw*: magnitud momento.

III. METODOLOGÍA

Esta investigación ha propuesto un diagrama de flujo mostrado en la figura 1 que esquematiza de forma simplificada el proceso seguido para obtener las curvas de fragilidad del edificio 4F.

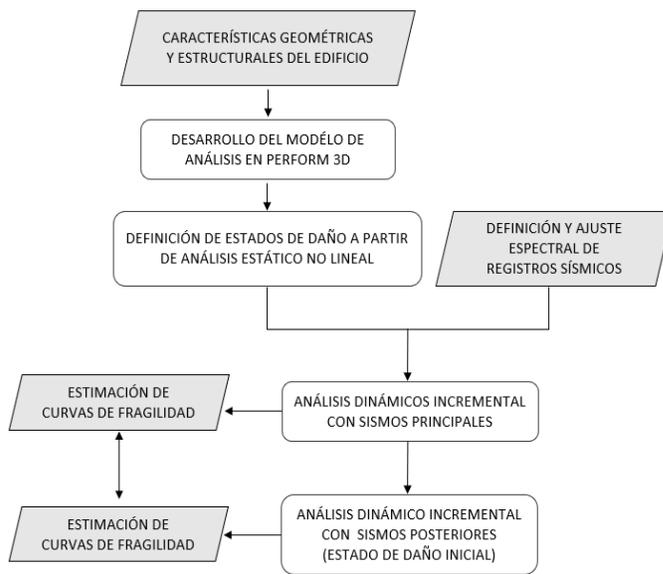


Fig. 1 Diagrama de flujo para la metodología propuesta. En color plomo se muestran las entradas y salidas. Ref. [1]

En la Universidad Nacional de Cajamarca el 80% de los edificios están conformados por pórticos de concreto armado. El edificio 4F fue construido en el año 2009 y su sistema estructural consta de pórticos de concreto armado en las dos direcciones ortogonales, siete pórticos en la dirección X-X y tres pórticos en la dirección Y-Y, con losas aligeradas de 20cm de espesor. Posee tres niveles con un área de 840 m² cubierto con una estructura liviana de teja andina. Este edificio que pertenece a la Facultad de Derecho y Ciencias Políticas cuenta con una configuración estructural típica de las edificaciones educativas en el Perú, diseñadas de acuerdo con la normativa sismorresistente vigente a la fecha de su construcción, puede albergar aproximadamente a 500 personas durante su funcionamiento, incluyendo estudiantes, docentes y personal administrativo. Además, por su naturaleza como infraestructura educativa, constituye una edificación esencial que tiene el potencial de ser utilizado como refugio en casos de desastres naturales. [1]

Las propiedades principales de los materiales que conforman los elementos de concreto armado del edificio 4F se muestran en la siguiente tabla:

TABLA I
PROPIEDADES DE MATERIALES DEL EDIFICIO 4F

Nº	Propiedades	Valor
1	Resistencia a la compresión	
	Vigas	16,18 MPa
	Columnas	19,02 MPa
2	Módulo de elasticidad	
	Vigas	19459,49 MPa
	Columnas	18895,30 MPa
3	Módulo de poisson	0,20
4	Esfuerzo de fluencia del acero	769,82 MPa
5	Módulo de elasticidad del acero	205939,65 MPa

Ref. [1]

Las características geométricas propias de la estructura del edificio 4F han sido obtenidas a partir de los planos del proyecto y del estudio previo realizado por [2]. Se muestra a continuación un esquema de las dimensiones globales de la estructura.

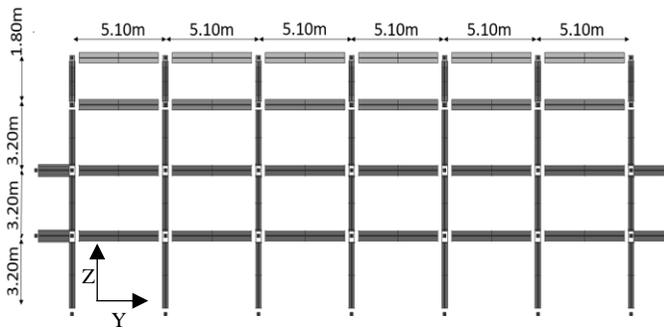


Fig. 2 Dimensiones en elevación lateral de edificio 4F. Se observan 07 porticos en la dirección X-X (cara frontal)
Ref. [1]

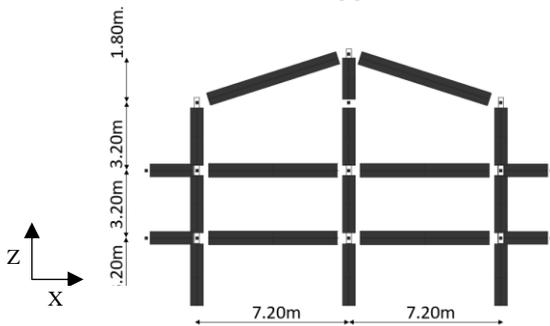


Fig. 3 Dimensiones en elevación frontal del edificio 4F. Se observan 03 porticos en la dirección Y-Y (cara laterale)
Ref. [1]

Se consideró que los elementos de los pórticos soportan principalmente el momento flector y que las relaciones entre fuerza y deformación están determinadas por la elasticidad y plasticidad en flexión. Las vigas, con fuerza axial nula y comportamiento biaxial insignificante, contrastan con las columnas, que resisten la fuerza axial y el pandeo biaxial. [2]

El modelo en Perform3D [7] se construyó a partir de la representación de elementos estructurales (vigas y columnas) con plasticidad concentrada. Para el desarrollo de este modelo no se han considerado los efectos de los elementos no estructurales. Las cargas de gravedad se han considerado como cargas vivas y cargas muertas de acuerdo con [3] y se han aplicado en cada nodo del modelo.

Las columnas de la edificación fueron modeladas mediante componentes denominados “columna FEMA”, definidos a partir de relaciones cuerda-rotación indicados en el documento FEMA 356 [8]. Estos componentes están conformados de una rótula plástica más un segmento elástico definido por la sección del elemento, además de tomar la interacción fuerza axial-flexión en las dos direcciones ortogonales [1]. Se han idealizado como empotradas en la base y tomando una unión rígida con las vigas. Se asumió un modelo e-p-p (elastoplástico perfecto) para reducir la complejidad y la incertidumbre de su comportamiento plástico. [2]

Las vigas fueron modeladas como elementos “Fema beam concrete type” a partir del modelo “chord rotation” definidos en FEMA 356 [8] y propuestos en Perform3D [7]. En este modelo, cada miembro está compuesto de dos segmentos idealizados con un elemento viga elástico y una rótula plástica; los parámetros para el modelo están indicados en [2].

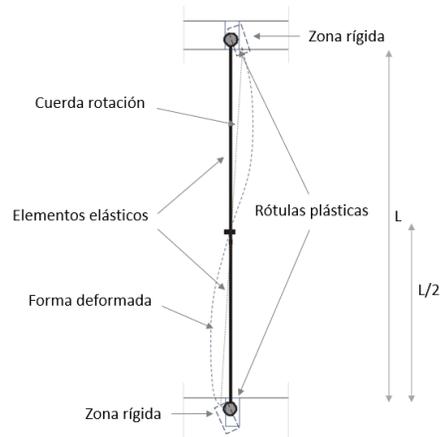


Fig. 4 Modelo analítico de columnas.
Ref. [1]

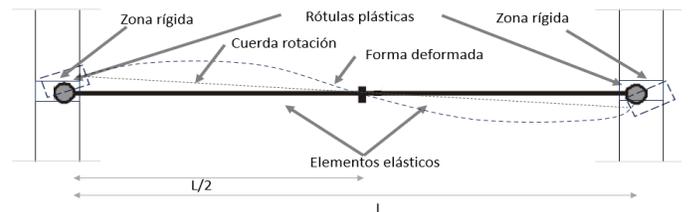


Fig. 5 Modelo analítico de vigas.
Ref. [1]

Por otra parte, no se ha tenido en cuenta la pérdida súbita de la resistencia de los elementos, ya que se anticipa una degradación gradual en su capacidad estructural, la cual sucede en la mayoría de los casos observados. La degradación de rigidez que se produce durante los ciclos de carga y descarga fue modelada para las vigas y columnas mediante factores de degradación de energía. En esta investigación se emplearon los factores utilizados en [6]: $Y=1$, $U=0.9$, $L=0.7$, $R=0.4$ y $X=0.3$. Con el modelo creado en Perform3D [7], se realizó un conjunto de análisis estáticos no lineales para estimar la curva de capacidad en cada dirección ortogonal. De esta forma se han obtenido los estados límite de acuerdo con [9]. Estos son, ND: Totalmente operacional, IO: ocupación inmediata, LS: seguridad de vida y CP: prevención del colapso. El parámetro de demanda usado fue la deriva de entrepiso.

Respecto a los sismos empleados en esta investigación, se seleccionó 07 registros, cada uno con un registro de sismo posterior correspondiente. Los registros sísmicos fueron obtenidos de las bases de datos de Perú y Chile y se muestran en la tabla II. Estos registros han sido ajustados espectralmente al nivel de peligro sísmico esperado en el área de estudio. Para esto se construyó el espectro de respuesta bajo los parámetros que simulan las condiciones de terreno y aceleración esperada de acuerdo con [3] y se escaló a un nivel de sismo frecuente de acuerdo con [1].

TABLA II
REGISTROS SÍSMICOS USADOS EN ESTA INVESTIGACIÓN

N°	Nombre	Tipo *	Ubicación		Mw.	Fecha
			Lat.	Lon.		
1	Tocopilla	P	-22.42	-70.13	7.7	14/11 /2007
		R	-23.13	-70.52	6.8	15/11 /2007
2	Maule	P	-36.29	-73.24	8.8	01/04/2014
		R	-36.29	-73.24	6.1	03/04/2014
3	Iquique	P	-19.57	-70.91	8.2	01/04/2014
		R	-20.52	-70.44	7.6	03/04/2014
4	Coquimbo	P	-31.51	-71.86	8.4	16/19/2015
		R	-31.62	-71.75	7.1	16/09/2015
5	Valparaíso	P	-33.14	-71.87	7.8	03/03/1985
		R	-34.13	-71.62	7.2	09/04/1985
6	Lima	P	-75.97	-14.44	6.9	28/10/2011
		R	-76.05	-14.54	5.8	28/10/2011
7	Arequipa	P	-18.02	-70.25	4.8	13/07/2005
		R	-18.02	-70.25	4.8	13/07/2005

*Las letras P refiere a sismo principal y R a sismo posterior o réplica. Ref. [1]

Para inducir los niveles de daño esperados como consecuencia de un sismo principal, se realizaron análisis dinámicos incrementales (IDA), de esta forma se establecieron las relaciones de intensidad y parámetro de demanda que gobiernan la estructura bajo cada registro sísmico. El parámetro de intensidad usado fue el PGA, el amortiguamiento fue tomado como 5% del amortiguamiento crítico para cada uno de los modos de vibración, asimismo 0.2% de amortiguamiento de Rayleigh fue tomado para asegurar que los modos altos no dominen la respuesta de acuerdo con [6].

Se realizaron análisis dinámicos incrementales para los 07 registros sísmicos principales seleccionados, mostrados en la

Tabla II, ajustados espectralmente al nivel de peligro sísmico de la zona de estudio. Para cada registro se ha realizado un conjunto de 20 análisis obteniendo un total de 140 análisis en cada dirección ortogonal. El parámetro de intensidad PGA (g) ha sido escalado, en promedio, en un rango de 0.18g a 0.92g de acuerdo con [1]. A partir de los resultados obtenidos en los análisis dinámicos en sismos principales se identificaron las intensidades en PGA (g) para las cuales se alcanzó cada estado de daño definidos por la curva de capacidad de la edificación en cada dirección de análisis. Posteriormente, en cada registro sísmico especificado para el nivel de daño identificado, se conformó la secuencia de sismos adicionándole el registro del sismo posterior, ajustado espectralmente al nivel de peligro sísmico, como se observa en el esquema de la figura 6. Con estos registros conformados, se ejecutó los análisis dinámicos incrementales, escalando solo el registro del sismo posterior. De los resultados obtenidos se asociaron las nuevas intensidades en PGA (g) con los niveles de daño establecidos. [1]

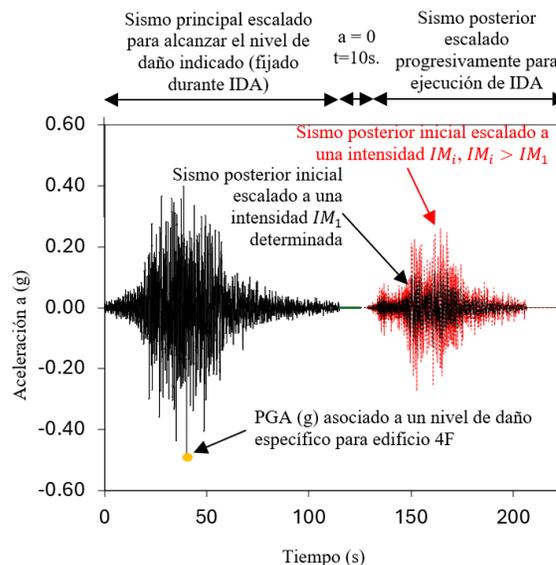


Fig. 6 Esquema de secuencias de sismos conformados para análisis dinámico incremental IDA. Ref. [1]

Para la estimación de las curvas de fragilidad de sismos principales, en esta investigación se ha empleado la formulación teórica presentada por [6]:

Asumiendo una distribución lognormal de la respuesta estructural, la probabilidad de que EDP_{ms} exceda EDP_{Lsi} condicionada sobre IM_{ms} puede ser estimada como:

$$1 - \Phi \left[\frac{\ln(edp_{ms,i}) - \ln(\lambda(EDP_{ms}|IM_{ms}))}{\beta(EDP_{ms}|IM_{ms})} \right] \quad (1)$$

Donde EDP_{ms} es el parámetro de demanda de la estructura bajo el sismo principal, Lsi es de i -ésimo estado límite de la estructura, EDP_{Lsi} es el umbral del parámetro de

demanda para LSi , IM_{ms} es el parámetro de intensidad del sismo principal, $edp_{ms,i}$ es el parámetro de demanda la i -ésima iteración y $\Phi[\cdot]$ es la función de distribución normal acumulada.

De igual forma, la metodología seguida para el análisis de la fragilidad, considerando un sismo posterior, o curvas fragilidades condicionales, se ha realizado siguiendo el mismo estudio de [6]. Considerando una distribución lognormal de la respuesta estructural bajo la secuencia sismo principal-sismo posterior, la probabilidad de que EDP_{seq} exceda EDP_{Lsi} condicionada sobre IM_{ms} puede ser estimada como:

$$P(EDP_{seq} \geq EDP_{Lsi} | IM_{ms}, \nabla IM = i) = 1 - \Phi \left[\frac{\ln(EDP_{Lsi}) - \ln(\lambda(EDP_{seq} | IM_{ms}, \nabla IM = i))}{\beta(EDP_{seq} | IM_{ms}, \nabla IM = i)} \right] \quad (2)$$

Donde EDP_{seq} es el parámetro de demanda de la estructura bajo la secuencia sismo principal-sismo posterior, LSi es de i -ésimo estado límite de la estructura, EDP_{Lsi} es el umbral del parámetro de demanda para LSi , IM_{ms} es el parámetro de intensidad del sismo principal, $edp_{ms,i}$ es el parámetro de demanda la i -ésima iteración y $\Phi[\cdot]$ es la función de distribución normal acumulada.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificó los estados límite o niveles de daño específicos para edificio 4F en ambas direcciones de análisis.

En la dirección X-X, la sectorización se muestra a continuación:

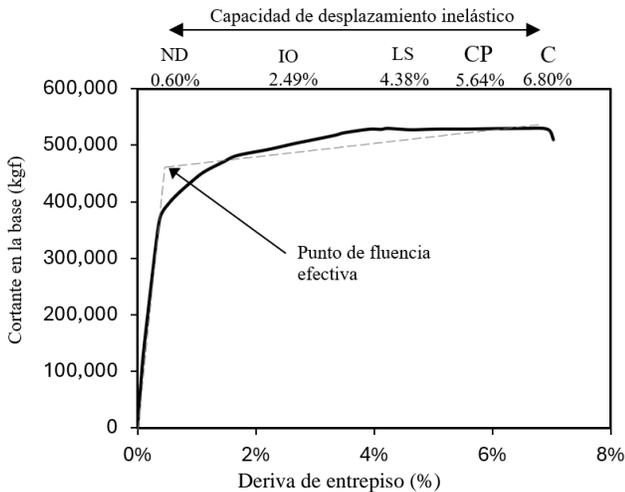


Fig. 7 Sectorización de curva de capacidad y estados límite para edificio 4F en la dirección X-X. Ref. [1]

TABLA III
RESUMEN DE ESTADOS LÍMITE DE DESPLAZAMIENTO X-X

Nº	Estado Límite	Deriva %
1	Totalmente operacional: ND	0.60%
2	Ocupación inmediata: IO	2.49%
3	Seguridad de vida: LS	4.38%
4	Prevención del colapso: CP	5.64%
5	Colapso: C	6.80%

Ref. [1]

En la dirección Y-Y, la sectorización se muestra a continuación:

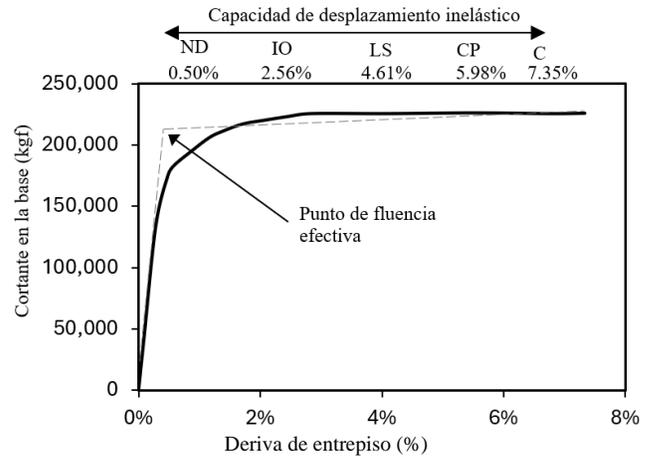


Fig. 8 Sectorización de curva de capacidad y estados límite para edificio 4F en la dirección Y-Y. Ref. [1]

TABLA IV
RESUMEN DE ESTADOS LÍMITE DE DESPLAZAMIENTO Y-Y

Nº	Estado Límite	Deriva %
1	Totalmente operacional: ND	0.50%
2	Ocupación inmediata: IO	2.56%
3	Seguridad de vida: LS	4.61%
4	Prevención del colapso: CP	5.98%
5	Colapso: CP	7.35%

Ref. [1]

En las figuras 7 y 8 se muestra la curva de capacidad alcanzada por la edificación en la dirección X-X y Y-Y de análisis respectivamente, para un rango incremental de valores de deriva de entrepiso. En ambas direcciones ortogonales se observa un comportamiento elástico inicial y luego un comportamiento dúctil que demuestra su capacidad de desplazamiento inelástico después del estado límite ND.

En las tablas III y IV se indican los estados límite definidos a partir de la propuesta de [9] y estimados mediante la curva de capacidad. Estos definen de forma teórica los umbrales de desplazamiento lateral que puede soportar el edificio asociados un concepto de nivel de daño.

Posteriormente a identificar los estados límite, se muestran los resultados de los análisis dinámicos incrementales (dirección X-X y Y-Y), en ellos se grafican los estados límite en función de la deriva de entrepiso.

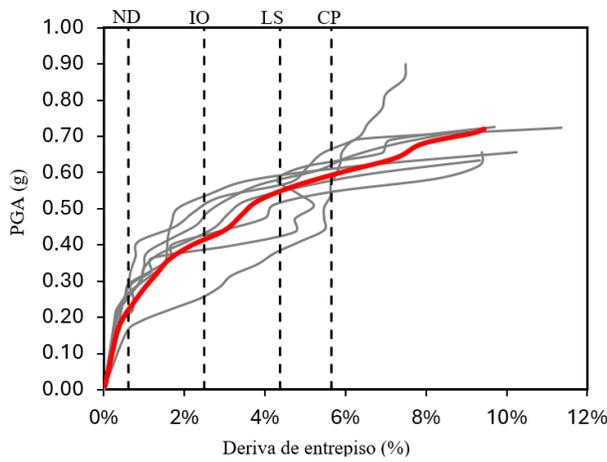


Fig. 9 Resultados de análisis dinámico incremental la dirección X-X para los sismos seleccionados en este estudio Ref. [1]

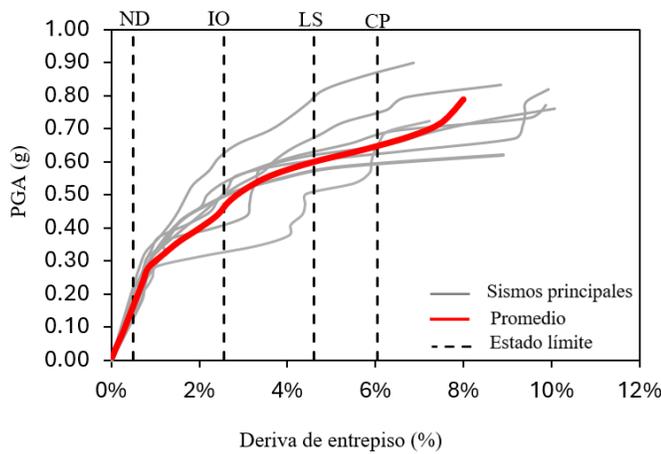


Fig. 10 Resultados de análisis dinámico incremental la dirección Y-Y para los sismos seleccionados en este estudio Ref. [1]

En las figuras 9 y 10 se muestran las relaciones obtenidas entre el PGA de cada sismo principal y la deriva generada en el edificio. En ambas direcciones se aprecia un comportamiento inicial elástico con una relación directa entre PGA y deriva de entrepiso, hasta aproximadamente 0.50% y 1.50% en los ejes X-X y Y-Y respectivamente; y luego un desarrollo inelástico que demuestra el comportamiento no lineal de la estructura y su posterior pérdida de capacidad. Las derivas máximas alcanzadas en promedio son de 11% en la dirección X-X y 10% en la dirección Y-Y. Se observa, además, que el rango inelástico de las dos direcciones de análisis supera el estado límite de prevención del colapso establecido a partir del análisis estático no lineal de acuerdo con [1].

En las figuras 11 y 12 se muestra los resultados obtenidos para la estimación de curvas de fragilidad en las direcciones X-X y Y-Y respectivamente del edificio 4F. Se aprecia en líneas continuas las curvas de fragilidad iniciales (sismos principales), y en líneas discontinuas las curvas de fragilidad condicionales

(sismos posteriores) para los estados límite ND: Totalmente operacional, IO: Ocupación inmediata, LS: seguridad de vida y CP: prevención del colapso.

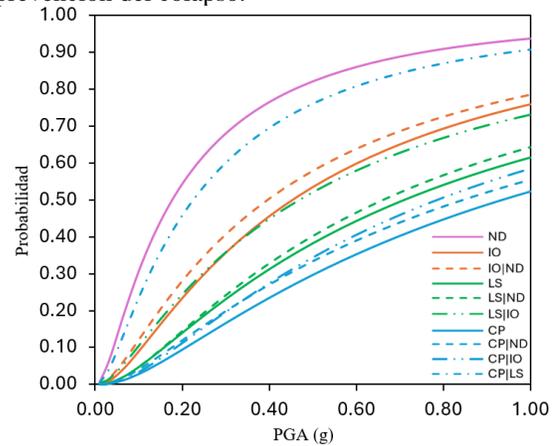


Fig. 11 Resultados de curvas de fragilidad la dirección X-X para los diferentes estados de daño inicial Ref. [1]

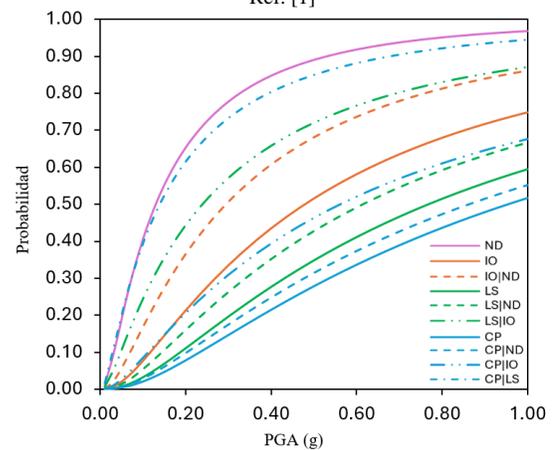


Fig. 12 Resultados de curvas de fragilidad la dirección Y-Y para los diferentes estados de daño inicial Ref. [1]

Las curvas relacionan la intensidad sísmica (descrita en términos de PGA del registro sísmico) y la probabilidad de alcanzar el nivel o estado de daño indicado. En ambas figuras 11 y 12, en el caso de las curvas con líneas continuas, se observa que la probabilidad de alcanzar los niveles de daño inferiores es mayor para un mismo PGA. Estas curvas corresponden a un sismo único, es decir, bajo condiciones de daño inicial nulo [1].

Por otro lado, en las líneas discontinuas se representan las curvas de fragilidad calculadas para condiciones de daño preestablecidas, es decir, simulando la secuencia de sismo. En ambas figuras 11 y 12 se observa un cambio significativo en la forma de estas curvas respecto a las curvas en línea continua, la probabilidad de daño en la dirección X-X incrementa entre un 5% y un 35%, desde el estado ND hasta el estado CP. Por su parte, en la dirección Y-Y, esta probabilidad aumenta entre un 17% y un 59%, bajo las mismas condiciones. Este cambio se refleja en un desplazamiento vertical, como se ilustra en la

figura 13, lo que indica una mayor probabilidad de daño para el mismo valor de PGA, es decir, un incremento en la probabilidad de daño para el sismo posterior que es mayor cuando el estado límite se acerca al colapso.

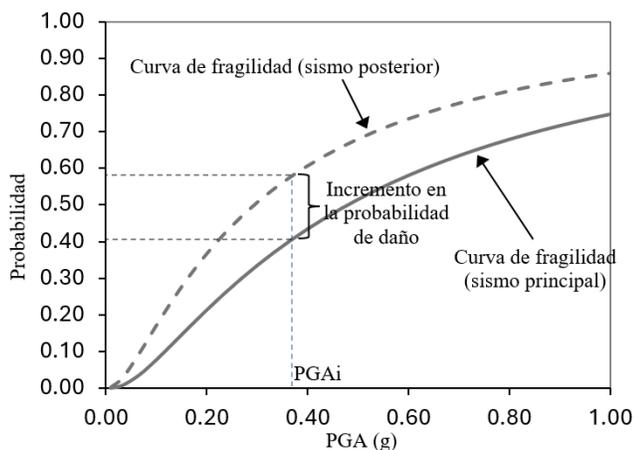


Fig. 13 Esquema del cambio en la forma de curva de fragilidad debido a sismo posterior
Ref [1]

En la figura 14 se observa el comportamiento del modelo de análisis para una de las secuencias de sismos. Se observa que el sismo principal generó un desplazamiento residual inicial, como respuesta del daño acumulado por la degradación de rigidez y la disipación de energía.

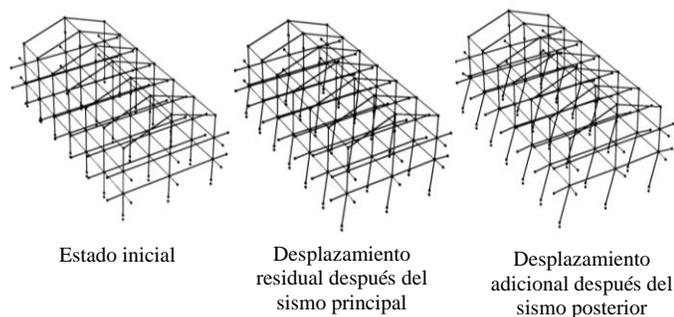


Fig. 14 Esquema gráfico del comportamiento del edificio 4F respecto a un sismo principal y la ocurrencia de un sismo posterior
Ref [1]

Tras este evento, el sismo posterior provocó un desplazamiento mayor y un incremento significativo en el daño estructural. Debido a esto, se evidencia de igual forma que [4], que el desplazamiento residual tras un sismo se convierte en el nuevo punto de referencia para los sismos posteriores.

V. CONCLUSIONES

Los resultados analizados demuestran que las secuencias de sismos incrementan la probabilidad de daño estimada en el edificio 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca. De acuerdo con esta investigación, la probabilidad de daño en la

dirección X-X incrementa desde 5% hasta 35%; y en la dirección Y-Y, esta probabilidad aumenta desde 17% hasta 59%, desde el estado totalmente operacional (ND) hasta el estado prevención de colapso (CP).

En ese sentido, se evidencia que existe un desplazamiento residual como respuesta a la acumulación de daños generados por el primer sismo y este tiene influencia en el estado límite posterior. Por tanto, la ocurrencia de un sismo posterior provoca un aumento en la probabilidad de daño; de esta forma, los daños ocasionados por las secuencias de sismos son más significativos, sobre todo cuando el edificio ya está cercano al colapso.

Los resultados obtenidos corresponden a un edificio porticado típico de infraestructura educativa en el Perú, por lo que estudiar otros edificios porticados de similar configuración se obtendrían resultados similares. Sin embargo, se recomienda el estudio de edificaciones con otras configuraciones estructurales para ampliar el entendimiento de los efectos de los sismos sucesivos en las infraestructuras civiles.

REFERENCIAS

- [1] E. Aguilar, "Sismos sucesivos y su influencia en la estimación de probabilidad de daño por medio curvas de fragilidad para el edificio "4F" de la Universidad Nacional de Cajamarca", Tesis de maestría, Universidad Nacional de Cajamarca, 2024.
- [2] E. Aguilar, "Incorporación de réplicas en el desempeño sísmico de los edificios 2H y 4F de la Universidad Nacional de Cajamarca", Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca, 2019.
- [3] Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Diseño sismorresistente, Norma E030. Lima, 2019.
- [4] W. Huang, J. Qian y Q.S. Fu, "Damage Assessment of RC Frame Structures under Mainshock-Aftershock Seismic Sequences", *Advanced Material Research*, Vol 446-449, pp. 39-44, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.111729>
- [5] H. Shafaei y H. Naderpour, "Seismic fragility evaluation of FRP-retrofitted RC frames subjected to mainshock-aftershock records", *Structures*, Vol. 27, pp. 950-961, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.07.018>.
- [6] W. Wen, C. Zhai, D. Ji, S. Li y L. Xie, "Framework for the vulnerability assessment of structure under mainshock-aftershock sequences", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 101, pp. 41-52, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.07.002>
- [7] CSI Computers and Structures, Inc., Perform3D, Trial Versión 8.1.0, Berkeley, California USA, 2022.
- [8] FEMA Federal Emergency Management Agency, FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings, Washington, D.C., 2000.
- [9] SEAOC Structural Engineers Association of California, Vision 2000, "Performance based seismic engineering of buildings", Sacramento, California: Structural Engineering Association of California; 1995.