

ESTUDIO COMPUTACIONAL DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE CONSTRUCCIONES INFORMALES EN EL AMBA

Latorres, Lucia; Balbi, Mariano

Facultad de ingeniería - UBA, llatorres@fi.uba.ar

Palabras clave: Riesgo sísmico, Vulnerabilidad, Construcción informal.

RESUMEN

El Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) está clasificada dentro de la Zona 0 de la zonificación sísmica del Reglamento INPRES-CIRSOC 103¹, correspondiente a la categoría de menor peligrosidad sísmica del país. No obstante, la ausencia generalizada de criterios sismorresistentes en el diseño de las edificaciones y el notable incremento de estructuras auto-construidas en las últimas décadas motiva el estudio de su posible vulnerabilidad estructural ante eventos sísmicos poco frecuentes. En este trabajo se desarrolla un conjunto de curvas de fragilidad para caracterizar la vulnerabilidad sísmica de una tipología de vivienda informal representativa del AMBA, conformada por pórticos de hormigón armado con muros de mampostería de ladrillo hueco, ampliamente difundida en barrios populares de la región. Para ello se elaboraron modelos estructurales dinámicos que representan distintos niveles de calidad constructiva y se aplicó la metodología de análisis dinámico incremental (IDA) mediante registros sísmicos escalados. A partir de los análisis realizados se estimó la probabilidad de alcanzar distintos estados de daño estructural en función de la intensidad sísmica. Los resultados obtenidos muestran que las estructuras diseñadas sin criterios ingenieriles mínimos pueden aumentar significativamente su vulnerabilidad y aumentar significativamente el riesgo sísmico regional incluso en entornos de baja sismicidad.

ABSTRACT

The Metropolitan Area of Buenos Aires (AMBA) is classified as Zone 0 within the seismic zoning of the INPRES-CIRSOC 103 regulations, corresponding to the lowest seismic hazard category in the country. Nevertheless, the widespread absence of seismic design criteria and the significant increase in self-built structures over recent decades motivate the study of their potential structural vulnerability to infrequent seismic events. In this work, a set of fragility curves is developed to characterize the seismic vulnerability of an informal housing typology representative of the AMBA. This typology, widely found in the region's popular neighborhoods, consists of reinforced concrete frames with hollow brick masonry infills. For this purpose, dynamic structural models representing different levels of construction quality were developed, and the Incremental Dynamic Analysis (IDA) methodology was applied using scaled seismic records. Based on the performed analyses, the probability of reaching various structural damage states was estimated as a function of seismic intensity. The results show that structures designed without minimum engineering criteria can significantly increase their vulnerability and significantly increase regional risk even in low seismicity contexts.

1. Introducción y objetivos

En el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA), la problemática del riesgo sísmico ha sido tradicionalmente relegada a un segundo plano debido a su clasificación dentro de la Zona 0 del Reglamento INPRES-CIRSOC 103¹, correspondiente al nivel más bajo de peligrosidad sísmica del país. Esta condición ha contribuido a consolidar una percepción generalizada de riesgo prácticamente nulo, tanto en el ámbito técnico como en la práctica constructiva. En este contexto, el diseño estructural suele estar gobernado por otras acciones, en particular las cargas de viento, bajo el supuesto implícito de que una estructura capaz de resistir dichas solicitaciones presentará un desempeño adecuado frente a eventuales acciones sísmicas.

No obstante, esta simplificación puede resultar insuficiente para caracterizar el comportamiento real de ciertas tipologías estructurales. En particular, las edificaciones de baja altura, típicamente asociadas a períodos de vibración cortos, pueden experimentar niveles de demanda estructural elevados frente a movimientos sísmicos locales, aun cuando la amenaza global sea considerada reducida. En este sentido, la aparente seguridad derivada de la baja peligrosidad sísmica puede conducir a una subestimación del riesgo. Si bien la recurrencia de eventos es baja, existen antecedentes históricos, como el sismo del Río de la Plata del 5 de junio de 1888, que alcanzó una magnitud de 5.5 en la escala de Richter y fue percibido en Buenos Aires y ciudades cercanas. Este hecho evidencia que la región no se encuentra completamente exenta de actividad sísmica y refuerza la necesidad de revisar críticamente dicha percepción, especialmente en contextos donde las condiciones constructivas no responden a criterios técnicos adecuados.

Las condiciones del subsuelo en el AMBA constituyen un aspecto relevante en la evaluación de la respuesta sísmica del sitio. La presencia de un paquete sedimentario de gran espesor modifica la propagación de las ondas sísmicas, dando lugar a efectos de amplificación del movimiento y, en ciertos casos, a fenómenos de resonancia suelo–estructura cuando los períodos del terreno y de las edificaciones resultan similares. Más recientemente, estudios como los desarrollados por Bertero et al.² y Bertero y Bertero³ han puesto en evidencia que la combinación de suelos blandos y ciertas condiciones constructivas puede intensificar la respuesta estructural, incluso frente a sismos lejanos, lo que resalta la importancia de considerar los efectos locales del sitio en el análisis de la demanda sísmica. Bajo estas condiciones, la problemática se intensifica al considerar a los sectores más vulnerables dentro de la infraestructura edilicia urbana. En particular, la vivienda informal, ampliamente extendida en el AMBA, se desarrolla generalmente al margen de toda regulación técnica, sin control en la calidad de los materiales, en el dimensionamiento de los elementos estructurales ni en los detalles constructivos. Según el Registro Nacional de Barrios Populares⁴ existen más de 1.200 barrios populares que alojan cerca de 495.000 familias, donde predominan viviendas autoconstruidas. La posible insuficiencia de los requisitos reglamentarios se ve amplificada por prácticas constructivas deficientes, configurando un escenario en el que incluso niveles moderados de sollicitación sísmica pueden traducirse en daños significativos. Experiencias como los sismos de Haití de 2010 (Mw 7.0) y México de 2017 (Mw 7.1) han evidenciado que la combinación de

construcciones precarias y efectos de sitio puede derivar en consecuencias severas. Si bien la situación del AMBA difiere, la ausencia de evaluaciones específicas sobre la vulnerabilidad de estas tipologías limita la comprensión integral del riesgo. La variabilidad propia de la construcción informal hace necesario considerar tipologías estructurales representativas que abarquen distintos niveles de calidad constructiva, desde condiciones altamente precarias hasta configuraciones que incorporan criterios normativos.

El riesgo sísmico se entiende como el resultado de la interacción entre el peligro sísmico y la vulnerabilidad estructural. El primero se asocia a la probabilidad de ocurrencia de movimientos de determinada intensidad, mientras que la segunda refiere a la susceptibilidad de las edificaciones a experimentar daño. Aun en regiones de baja amenaza, la presencia de altos niveles de vulnerabilidad puede traducirse en escenarios de riesgo no despreciables, lo que justifica la necesidad de metodologías que permitan su evaluación cuantitativa. A diferencia de regiones con una extensa historia sísmica, en el AMBA no se dispone de registros suficientes de daño observado que permitan desarrollar evaluaciones empíricas de vulnerabilidad para las tipologías informales analizadas. La escasez de eventos instrumentados y de información sistemática sobre el desempeño de estas construcciones frente a sismos hace necesario recurrir a metodologías analíticas basadas en modelos numéricos capaces de reproducir su respuesta estructural. Entre estas metodologías, las curvas de fragilidad se han consolidado como una herramienta clave para estimar la probabilidad de que una estructura alcance o supere distintos niveles de daño en función de la intensidad sísmica. Estas curvas se construyen analíticamente a partir de modelos estructurales computacionales y, en general, de análisis no lineales que permiten caracterizar la respuesta ante distintas demandas sísmicas. En particular, el Análisis Dinámico Incremental (IDA) se ha posicionado como un método ampliamente aceptado para este fin, ya que proporciona una visión detallada del comportamiento estructural, desde el régimen elástico hasta el colapso. El IDA consiste en aplicar al modelo un conjunto de registros sísmicos escalados progresivamente y obtener curvas que relacionan una medida de demanda estructural con una medida de intensidad sísmica.

La relación entre la demanda estructural y la intensidad sísmica constituye un aspecto central del análisis. La demanda estructural puede expresarse mediante la distorsión máxima de entrepiso (interstory drift ratio o drift), definida como la deformación relativa entre niveles consecutivos, mientras que la intensidad sísmica suele representarse mediante parámetros como la pseudoaceleración espectral (S_a) o la aceleración máxima del terreno (PGA). Este procedimiento permite identificar con precisión el punto en el que la estructura experimenta degradaciones significativas o falla, así como caracterizar la dispersión en el comportamiento debido a la variabilidad de los registros. Su capacidad para capturar de manera continua la transición entre diferentes estados de daño lo convierte en una herramienta especialmente útil para el desarrollo de curvas de fragilidad y para la evaluación probabilística del riesgo sísmico, tal como fue planteado originalmente por Vamvatsikos y Cornell⁵ y desarrollado posteriormente en trabajos de síntesis como el de Baker⁶.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la vulnerabilidad sísmica de tipologías representativas de vivienda informal del Área Metropolitana de Buenos Aires, con el fin de comprender cómo las diferencias en las condiciones constructivas inciden en su respuesta frente a la amenaza sísmica característica de la región y aportar evidencia sobre el riesgo sísmico y su posible impacto en el contexto socioeconómico de los barrios populares. Para ello, se evalúa el comportamiento estructural de distintas variantes representativas de la práctica constructiva informal, asociadas a diferentes niveles de calidad y cumplimiento de criterios técnicos, se estima la probabilidad de ocurrencia de distintos estados de daño mediante curvas de fragilidad obtenidas a partir de análisis dinámicos incrementales y se analiza la efectividad de mejoras constructivas parciales e integrales en la reducción de la vulnerabilidad estructural.

2. Metodología

Se adopta un enfoque basado en la modelación numérica y el análisis no lineal del comportamiento estructural de tipologías representativas de vivienda informal del AMBA. En primer lugar, se define una tipología estructural de referencia correspondiente a una vivienda de dos niveles y dos vanos, compuesta por pórticos de hormigón armado y muros de mampostería. A partir de esta configuración se desarrollan tres variantes que representan distintos niveles de calidad constructiva: una configuración precaria, que refleja las deficiencias más frecuentes de la práctica informal; una variante intermedia, con mejoras parciales; y un modelo reforzado, que incorpora criterios de diseño acordes a la normativa vigente. La definición de estas configuraciones se basa en relevamientos y registros fotográficos de edificaciones reales, lo que permite representar de manera consistente las condiciones constructivas observadas en el AMBA. Esta diferenciación permite abordar la variabilidad propia del entorno construido y analizar su incidencia en la respuesta sísmica. A partir de estas configuraciones, se desarrollan los modelos estructurales correspondientes, implementados en el entorno de cálculo OpenSeesPy, incorporando la no linealidad de materiales y elementos, así como las propiedades mecánicas, geométricas y de vinculación representativas de cada caso.

La caracterización de la acción sísmica se realiza a partir de la selección y procesamiento de un conjunto de 72 registros, conformado por fuentes representativas de distintos mecanismos de generación sísmica. En particular, se consideran registros correspondientes a regiones de corteza activa, obtenidos de bases de datos internacionales, y registros asociados a regiones continentales estables, generados mediante simulaciones, con el fin de representar condiciones compatibles con el entorno geológico del AMBA. Esta combinación permite contemplar tanto escenarios de demanda elevada como características más representativas de la sismicidad regional, capturando la variabilidad relevante para la evaluación estructural.

Sobre cada modelo estructural se ejecutan Análisis Dinámicos Incrementales (IDA), siguiendo el procedimiento propuesto por Vamvatsikos y Cornell⁵, mediante la aplicación de registros sísmicos escalados progresivamente en intensidad. Para cada

análisis se registran parámetros de respuesta como la distorsión máxima de entrepiso (drift), así como medidas de intensidad sísmica tales como la pseudoaceleración espectral (S_a) y la aceleración máxima del terreno (PGA), lo que permite construir curvas que relacionan medidas de demanda estructural con medidas de intensidad sísmica. La respuesta se interpreta en términos de estados de daño definidos a partir de umbrales de drift establecidos con base en antecedentes experimentales y guías de referencia. A partir de esta clasificación se ajustan funciones de fragilidad de tipo Log Normal, mediante la estimación de sus parámetros para cada estado de daño, lo que permite construir las curvas de fragilidad correspondientes a cada variante estructural. Finalmente, se realiza un análisis comparativo de los resultados, con el fin de identificar diferencias en la vulnerabilidad entre las distintas variantes estructurales, evaluar la influencia de la demanda sísmica característica de la región en su respuesta y analizar el efecto de las mejoras constructivas sobre el desempeño sísmico.

2.1. Amenaza sísmica

2.1.1. Zona de estudio

El Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) se encuentra clasificada dentro de la Zona 0 de la zonificación sísmica establecida por el Reglamento INPRES-CIRSOC 103¹, correspondiente a la categoría de menor peligrosidad sísmica del país. Como consecuencia, las edificaciones de la región generalmente no incorporan criterios específicos de diseño sismorresistente. La Figura 1 muestra la zonificación sísmica de Argentina, donde puede observarse que el AMBA se ubica fuera de las regiones de mayor peligrosidad, concentradas principalmente en el oeste y noroeste del país. A pesar de ello, la región no se encuentra completamente exenta de actividad sísmica. Antecedentes históricos, como el “terremoto del Río de la Plata” de 1888, y registros instrumentales asociados a eventos lejanos percibidos en la ciudad evidencian que las estructuras emplazadas en el AMBA pueden experimentar sollicitaciones sísmicas. Asimismo, las condiciones locales de suelo pueden amplificar dichos movimientos, por lo que la evaluación de la amenaza sísmica debe contemplar tanto la baja sismicidad regional como los efectos de sitio característicos de la región.

2.1.2. Selección de registros sísmicos

La evaluación de la vulnerabilidad estructural requirió la definición de un conjunto de movimientos sísmicos representativos de los escenarios potencialmente relevantes para el AMBA. Debido a la limitada disponibilidad de registros instrumentales locales de magnitud significativa, se adoptó una estrategia basada en la utilización de dos conjuntos complementarios de registros sísmicos.

Por un lado, se seleccionaron 48 registros naturales correspondientes a regiones de corteza activa (ACR), obtenidos de la base de datos NGA-West2 del Pacific Earthquake Engineering Research Center⁷, con magnitudes momento comprendidas entre 6.0 y 7.6 y distancias de ruptura entre 4.9 y 31.4 km. Por otro lado, se incorporaron 24 registros sintéticos representativos de regiones continentales estables (SCR), desarrollados por Bertero⁸ para el estudio de la amenaza sísmica en Buenos Aires. Estos registros corresponden a eventos de magnitud momento 6.0 y 6.5, distancias de ruptura de 10, 15 y 20 km, y distintos ángulos de azimut respecto

de la falla. La utilización conjunta de ambos conjuntos permite representar tanto la variabilidad inherente a los movimientos sísmicos reales como las particularidades asociadas a regiones continentales estables, consideradas representativas del contexto geológico del AMBA.

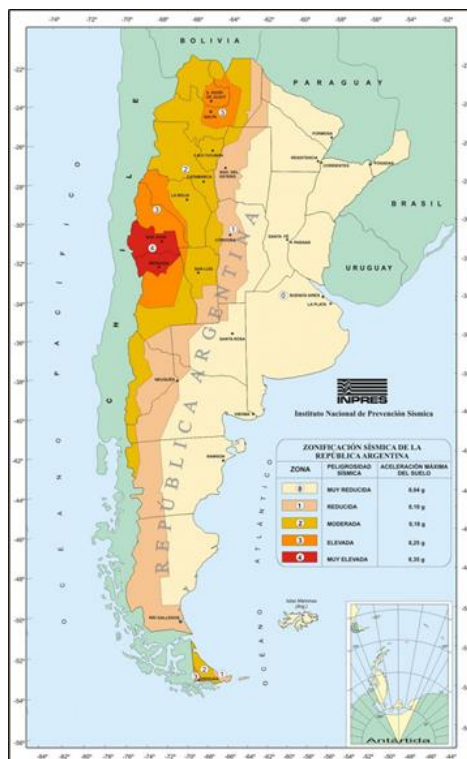


Figura 1. Zonificación sísmica de Argentina

La Figura 2 presenta una comparación entre registros representativos de ambas categorías. Puede observarse que los registros SCR presentan una mayor densidad de oscilaciones y un contenido de frecuencias altas más pronunciado que los registros ACR. Mientras que los registros naturales muestran una evolución temporal más irregular, característica de eventos reales, los registros SCR presentan una señal más compacta y concentrada en el tiempo, con una fase fuerte de movimiento más uniforme. Estas diferencias resultan particularmente relevantes para la evaluación de estructuras de baja altura sometidas a comportamiento no lineal.

Con el objetivo de representar las condiciones locales del AMBA, todos los registros fueron procesados mediante análisis unidimensional de respuesta de sitio utilizando el programa STRATA⁹. Para ello se adoptó un perfil geotécnico representativo de la región, compuesto por aproximadamente 300 m de depósitos sedimentarios apoyados sobre el basamento cristalino, construido a partir de la información reportada por Bertero et al.²⁻¹⁰, tal como se muestra en la Figura 3. Este procedimiento permitió obtener registros equivalentes en superficie, incorporando los efectos de amplificación asociados a los depósitos sedimentarios locales y garantizando condiciones de sitio homogéneas para todos los análisis dinámicos desarrollados posteriormente.

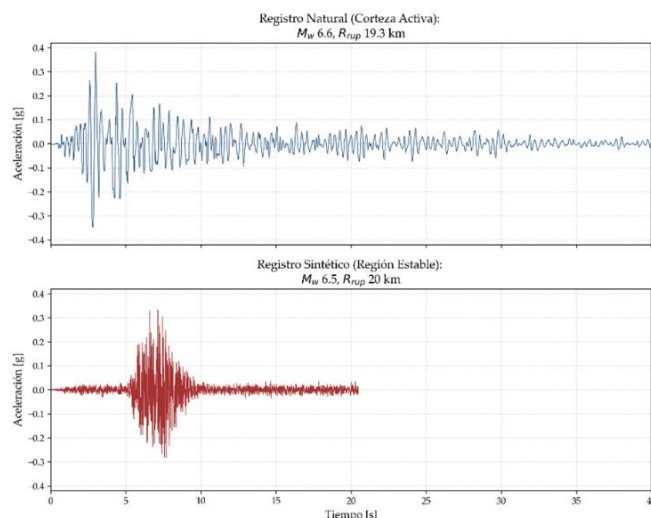


Figura 2. Comparación de historias de aceleración.

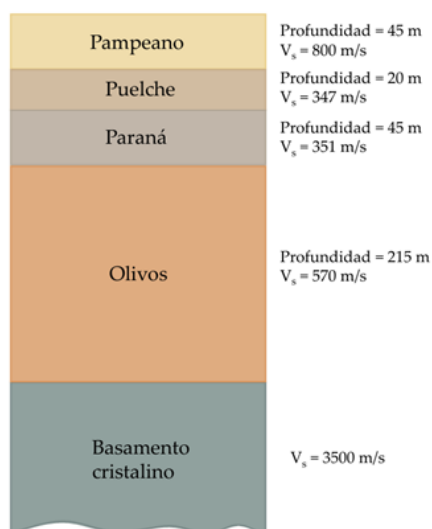


Figura 3. Perfil estratigráfico adoptado.

2.2. Modelo estructural

El Área Metropolitana de Buenos Aires concentra una importante cantidad de viviendas informales. De acuerdo con el relevamiento realizado por el Registro Nacional de Barrios Populares⁴, alrededor de 600.000 familias habitan en barrios populares de la región. Estas viviendas suelen desarrollarse mediante procesos de autoconstrucción progresiva, generalmente sin planificación estructural integral ni asistencia técnica especializada, lo que da lugar a deficiencias constructivas que pueden incrementar su vulnerabilidad frente a acciones sísmicas. Los relevamientos realizados muestran que en este tipo de construcciones coexisten distintas configuraciones estructurales y técnicas constructivas, entre ellas viviendas resueltas mediante mampostería confinada o encadenada y otras que incorporan pórticos de

hormigón armado con muros de mampostería de cerramiento. En el presente trabajo se seleccionó para su estudio esta última tipología, por considerarla representativa de un conjunto de las viviendas relevadas. Sobre la base de relevamientos de viviendas informales del AMBA¹¹ y observaciones efectuadas en el Barrio Popular Rodrigo Bueno, se adoptó una tipología estructural representativa compuesta por pórticos de hormigón armado con muros de mampostería de ladrillo hueco. El modelo corresponde a una vivienda de dos niveles, con luces de 4,0 m y altura de entrepiso de 2,7 m, utilizando un sistema de losas alivianas ampliamente difundido en este tipo de construcciones. La Figura 4 presenta el esquema estructural adoptado.

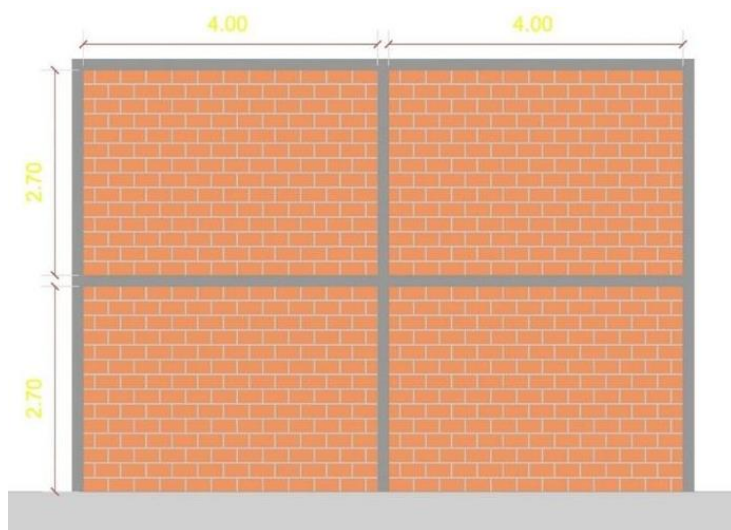


Figura 4. Esquema del modelo estructural analizado.

Con el objetivo de evaluar la influencia de las condiciones constructivas sobre la vulnerabilidad sísmica, se desarrollaron tres modelos estructurales que representan distintos niveles de calidad constructiva: un Modelo Precario, representativo de viviendas autoconstruidas sin asistencia técnica; un Modelo Intermedio, que incorpora mejoras parciales en dimensiones, armaduras y resistencia de materiales; y un Modelo Reforzado, que cumple con los requisitos reglamentarios del Reglamento CIRSOC 201¹². La Tabla 1 resume las principales características de cada modelo.

Los modelos estructurales fueron desarrollados en OpenSeesPy, empleando elementos no lineales capaces de representar la respuesta inelástica de estructuras de hormigón armado sometidas a acciones sísmicas. Las vigas y columnas se modelaron mediante elementos de fibras, incorporando formulaciones constitutivas específicas para el hormigón y el acero de las armaduras. La mampostería de los muros se representó mediante un modelo de bielas diagonales equivalentes, ampliamente utilizado para simular la interacción entre pórticos de hormigón armado y muros de cerramiento. Dado que estos muros modifican significativamente la rigidez lateral y la distribución de esfuerzos de la estructura, su incorporación resulta fundamental para una adecuada evaluación de la respuesta sísmica. En particular, se adoptó un esquema multibiela basado en el modelo de Chrysostomou¹³, que permite

representar la degradación progresiva de rigidez asociada a la fisuración y al daño de la mampostería. La Figura 5 presenta un esquema conceptual del modelo implementado.

Modelo	Vigas	Columnas	Armadura longitudinal	Estribos	Hormigón
Precario	15cm x 15cm	15cm x 15cm	4 ϕ 10	ϕ 6 c/30 cm	$f'_c = 15$ MPa
Intermedio	20cm x 30cm	20cm x 20cm	4 ϕ 12	ϕ 6 c/20 cm	$f'_c = 20$ MPa
Reforzado	20cm x 40cm	25cm x 25cm	Vigas: 2 ϕ 16 + 2 ϕ 16 + 1 ϕ 12 Columnas: 4 ϕ 16	Vigas: ϕ 6 c/18 cm Columnas: ϕ 6 c/15 cm	$f'_c = 25$ MPa

Tabla 1. Características de cada modelo.

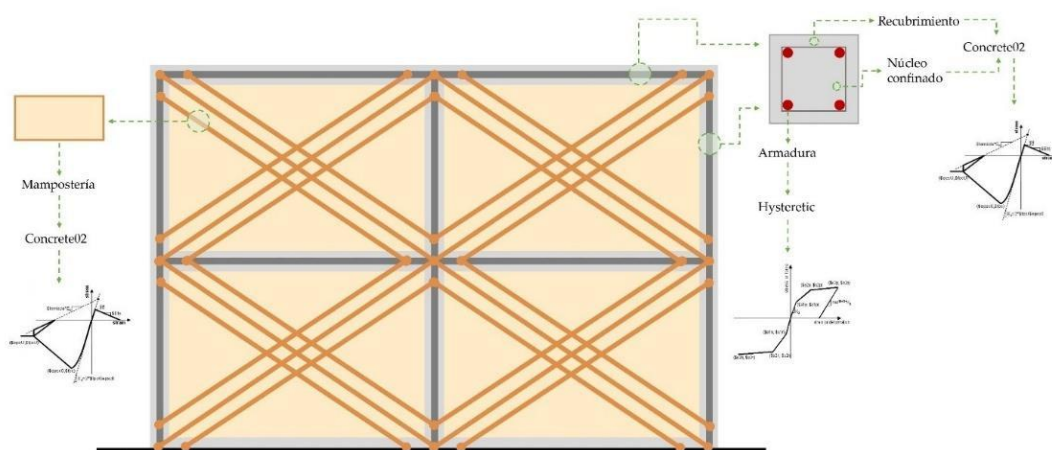


Figura 5. Esquema conceptual del modelo estructural implementado en OpenSees.

Las cargas gravitacionales y las masas sísmicas se definieron de acuerdo con los criterios establecidos por el Reglamento INPRES-CIRSOC 103¹⁴, constituyendo el estado de referencia sobre el cual se aplicaron posteriormente los análisis dinámicos incrementales. Se realizó un análisis modal para determinar las propiedades dinámicas de los modelos estructurales. Los períodos fundamentales obtenidos fueron de 0.247s, 0.32s y 0.262s para los modelos Precario, Intermedio y Reforzado, respectivamente. Estos valores resultan consistentes con edificaciones de baja altura de hormigón armado con mampostería y muestran una adecuada concordancia con las estimaciones empíricas propuestas por el Reglamento INPRES-CIRSOC 103¹⁴. Las diferencias observadas reflejan la influencia combinada de la rigidez y la masa estructural. En particular, el Modelo Reforzado presenta un período menor que el Modelo Intermedio, asociado al incremento de rigidez global introducido mediante el aumento de las secciones y resistencias de los elementos estructurales, que resulta predominante frente al incremento de masa.

2.3. Curvas de fragilidad

2.3.1. Fundamentos y metodología de análisis

La vulnerabilidad sísmica de las viviendas analizadas se evalúa mediante curvas de fragilidad, herramientas que permiten estimar la probabilidad de alcanzar o superar distintos estados de daño en función de la intensidad del movimiento sísmico. Estas curvas proporcionan una representación probabilística del desempeño estructural, vinculando la intensidad sísmica con los niveles esperados de daño. En este trabajo se emplea la formulación lognormal ampliamente utilizada en ingeniería sísmica, expresada mediante la Ecuación (1):

$$P[DS \geq i | IM = x] = \Phi \left(\frac{\ln(x) - \mu_i}{\beta_i} \right) \quad (1)$$

donde μ_i representa la mediana asociada al estado de daño considerado y β_i la dispersión logarítmica que refleja la variabilidad de la respuesta estructural. Esta formulación permite describir la vulnerabilidad sísmica mediante funciones continuas de probabilidad de excedencia. Para su construcción se empleó la metodología de Análisis Dinámico Incremental (IDA, Incremental Dynamic Analysis), propuesta por Vamvatsikos y Cornell⁵. Mediante esta técnica, los tres modelos estructurales desarrollados en OpenSeesPy fueron sometidos a los 72 registros sísmicos representativos de la amenaza del AMBA, escalados progresivamente hasta alcanzar niveles próximos al colapso. Los resultados obtenidos permitieron generar las curvas IDA de cada modelo y constituyeron la base para el ajuste de las curvas de fragilidad presentadas en los apartados siguientes. La Figura 6 muestra un ejemplo representativo de una curva IDA obtenida durante el análisis.

Como medida de intensidad sísmica (IM) se adoptó la aceleración espectral correspondiente al período fundamental de la estructura, $S_a(T_1)$, mientras que la medida de demanda (DM) utilizada fue la distorsión máxima de entrepiso (drift). Para cada análisis se construyeron pares intensidad–demanda (IM–DM), a partir de los cuales se generaron las curvas IDA de cada modelo.

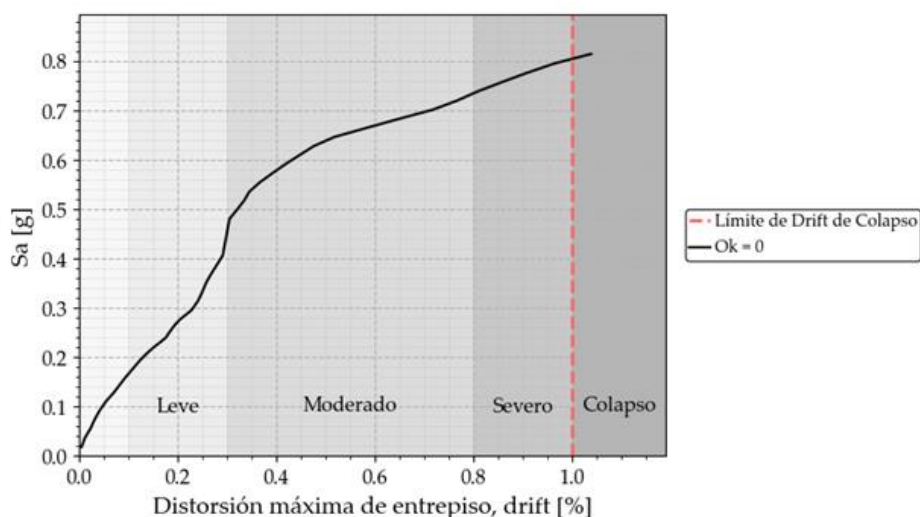


Figura 6. Ejemplo de curva IDA obtenida para uno de los registros sísmicos analizados.

2.3.2. Estados de daño

La evaluación del daño se realizó mediante cuatro estados límite definidos en función de la distorsión máxima de entrepiso: daño leve (0.1%), asociado a un comportamiento esencialmente elástico; daño moderado (0.3%), caracterizado por el inicio de la fisuración diagonal y de la degradación de rigidez; daño severo (0.8%), correspondiente a una degradación importante de la capacidad resistente; y colapso (1.0%), asociado a una pérdida significativa de estabilidad y capacidad portante.

Los análisis incrementales se extendieron hasta alcanzar condiciones de colapso definidas mediante criterios físicos y numéricos. El colapso se consideró alcanzado cuando la distorsión máxima de entrepiso superó el 1.0%, cuando la pendiente de la curva IDA descendió por debajo del 10% de la pendiente elástica inicial o cuando el modelo presentó problemas persistentes de convergencia numérica. Para cada registro sísmico se identificó la intensidad crítica asociada a cada estado de daño, información que posteriormente fue utilizada para estimar las curvas de fragilidad de los distintos modelos estructurales.

Para cada estado de daño se identificó la intensidad sísmica crítica (IM_c), definida como el menor valor de intensidad capaz de producir la superación del umbral de drift correspondiente. A partir de estos valores se estimaron los parámetros de las curvas de fragilidad mediante el método de Máxima Verosimilitud (MLE), ajustando una distribución Lognormal caracterizada por los parámetros μ y β . El procedimiento incorporó tanto los registros que alcanzaron el estado de daño como aquellos que no lo alcanzaron dentro del rango de intensidades analizado (observaciones censuradas), permitiendo obtener estimaciones estadísticamente consistentes y evitar sesgos en la caracterización de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras estudiadas.

3. Resultados

La Figura 7 presenta las líneas de tendencia de la relación $S_a(T_1)$ –drift ajustadas mediante ley de potencia para los tres modelos estructurales. Las curvas del Modelo Precario (Modelo 1) y el Modelo Intermedio (Modelo 2) se desarrollan dentro de rangos de intensidad similares, diferenciándose notoriamente del Modelo Reforzado (Modelo 3). Esta separación evidencia que las mejoras introducidas en el Modelo Reforzado generan un salto cualitativo en el desempeño: la estructura alcanza niveles de distorsión equivalentes bajo intensidades sísmicas considerablemente mayores.

En términos de colapso, la intensidad mediana asociada al Modelo Precario fue de 0.51 g para registros ACR y 0.43 g para registros SCR. El Modelo Intermedio presentó valores prácticamente idénticos (0.51 g y 0.45 g, respectivamente), lo que indica que las mejoras parciales incorporadas no producen una variación significativa en la capacidad última del sistema. El Modelo Reforzado, en cambio, exhibe medianas de colapso de 0.64 g y 0.62 g para ambos conjuntos, evidenciando una mejora sustancial. Asimismo, en el Modelo Precario e Intermedio los estados de daño severo y colapso se alcanzan en rangos de intensidad muy próximos, lo que refleja una ductilidad post-pico muy limitada. El Modelo Reforzado, en contraste, presenta una separación clara entre ambos estados, indicando una mayor capacidad de redistribución de esfuerzos antes del colapso global. En todos los modelos se observa que los registros SCR generan intensidades de colapso menores que los registros ACR, con una dispersión también mayor. Este comportamiento es consistente con el mayor contenido de altas frecuencias de los registros de regiones continentales estables, que resulta más demandante para estructuras de período corto como las analizadas.

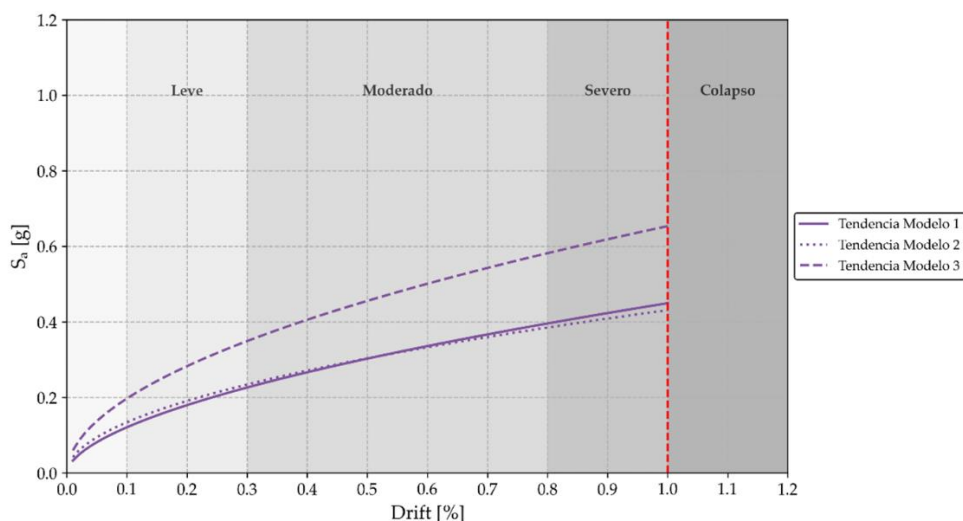


Figura 7. Comparativa de líneas de tendencia de los modelos analizados.

3.1. Curvas de fragilidad

Las Figuras 8 y 9 presentan las curvas de fragilidad para los estados de daño leve (DS_1) y moderado (DS_2) correspondientes a los tres modelos estructurales, para los conjuntos de registros ACR y SCR respectivamente. Se muestra el rango de

intensidades de mayor relevancia práctica para la región, dado que los estados de daño severo y colapso se asocian a intensidades considerablemente superiores a la amenaza esperada en el AMBA para estructuras de período corto.

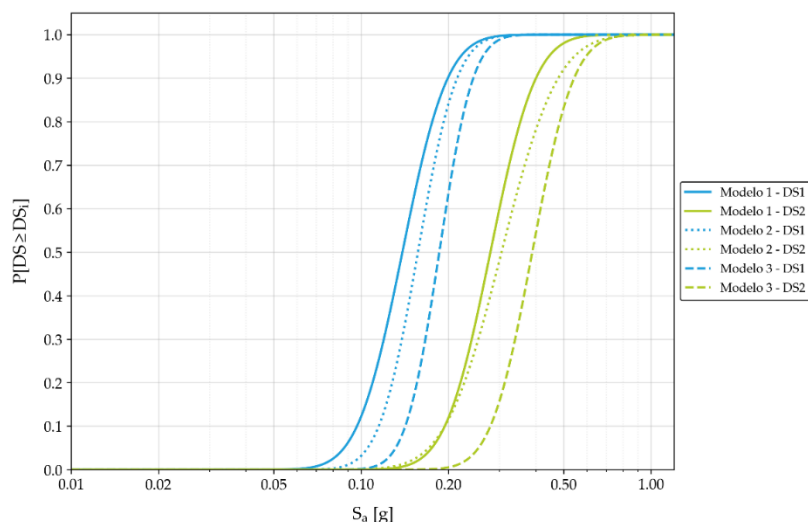


Figura 8. Curvas de fragilidad DS_1 – DS_2 – Registros ACR.

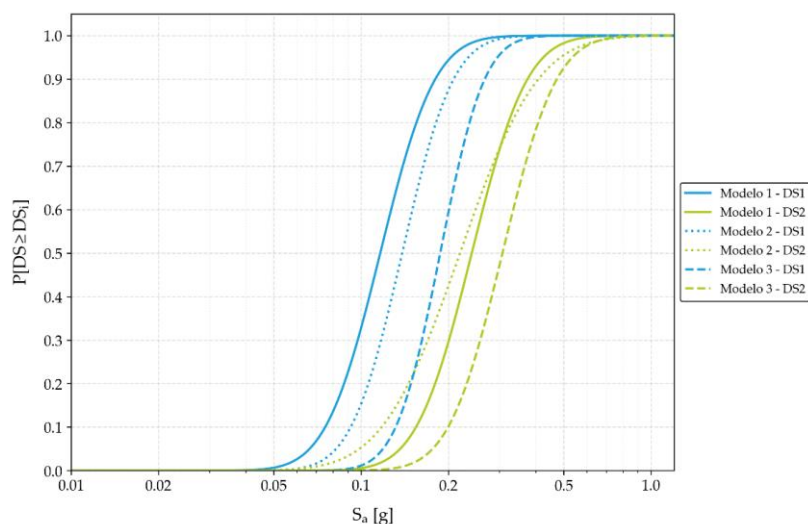


Figura 9. Curvas de fragilidad DS_1 – DS_2 – Registros SCR.

En ambos conjuntos de registros, el Modelo Precario exhibe las curvas desplazadas más a la izquierda, indicando una mayor probabilidad de alcanzar daño ante cualquier nivel de intensidad. La diferencia con el Modelo Intermedio es reducida, mientras que el Modelo Reforzado presenta un desplazamiento claramente mayor hacia intensidades más elevadas. Para los registros SCR, las curvas se ubican sistemáticamente a la izquierda de las correspondientes a los registros ACR en los modelos Precario e Intermedio, lo que confirma la mayor demanda impuesta por los registros de regiones continentales estables. Esta diferencia se atenúa

significativamente en el Modelo Reforzado, cuyas medianas para ambos conjuntos de registros son prácticamente coincidentes en los estados severo y colapso.

Para contextualizar los resultados en el marco de la amenaza sísmica local, las probabilidades de excedencia se evaluaron para dos niveles de intensidad de referencia: el nivel de diseño reglamentario ($S_a \approx 0.033$ g, probabilidad de excedencia del 10% en 50 años) y un nivel de intensidad relevante para estructuras de período corto en el AMBA según el modelo SAM2020 ($S_a \approx 0.15$ g). Las Tablas 2, 3 y 4 resumen los resultados obtenidos para los estados de daño DS_1 y DS_2 en los modelos Precario, Intermedio y Reforzado, respectivamente. Para el nivel de diseño reglamentario ($S_a = 0.033$ g), las probabilidades de excedencia resultan bajas en todos los modelos, aunque las diferencias relativas entre ellos son significativas: para registros SCR, la probabilidad de daño leve en el Modelo Precario es del orden de 10^5 veces mayor que en el Modelo Reforzado.

Modelo Precario

Tipo de registros	$S_a(T_1)$ [g]	$P(DS_1)$ [%]	$P(DS_2)$ [%]
ACR	0.033	4×10^{-5}	0.00
	0.15	60.82	1.40
SCR	0.033	1×10^{-2}	0.00
	0.15	77.11	8.56

Tabla 2. Probabilidades de excedencia, escenarios de amenaza del AMBA – Modelo Precario.

Modelo Intermedio

Tipo de registros	$S_a(T_1)$ [g]	$P(DS_1)$ [%]	$P(DS_2)$ [%]
ACR	0.033	0.00	0.00
	0.15	42.50	2.17
SCR	0.033	6×10^{-4}	6×10^{-3}
	0.15	59.78	21.71

Tabla 3. Probabilidades de excedencia, escenarios de amenaza del AMBA – Modelo Intermedio.

Modelo Reforzado

Tipo de registros	$S_a(T_1)$ [g]	$P(DS_1)$ [%]	$P(DS_2)$ [%]
ACR	0.033	0.00	0.00
	0.15	15.35	0.01
SCR	0.033	0.00	0.00
	0.15	21.04	1.68

Tabla 4. Probabilidades de excedencia, escenarios de amenaza del AMBA – Modelo Intermedio.

Las diferencias adquieren mayor relevancia al considerar el nivel $S_a \approx 0.15$ g, representativo de la amenaza para períodos cortos en el AMBA. En ese escenario, el Modelo Precario presenta probabilidades de daño leve de 60.8% (ACR) y 77.1% (SCR), frente a 15.4% y 21.0% del Modelo Reforzado. Para el daño moderado, las diferencias son aún más marcadas: el Modelo Precario muestra una probabilidad de 8.6% bajo registros SCR, valor más de cinco veces superior al del Modelo Reforzado (1.7%). El Modelo Intermedio, con 21.7% de probabilidad de daño moderado bajo registros SCR, no logra una reducción sustancial respecto al Modelo Precario, evidenciando que las mejoras parciales no se traducen en una disminución proporcional de la vulnerabilidad.

4. Conclusiones

Este trabajo analiza la vulnerabilidad sísmica de edificaciones informales típicas del Área Metropolitana de Buenos Aires mediante la construcción de curvas de fragilidad a partir de análisis dinámicos incrementales. Los resultados permiten caracterizar el desempeño estructural de estas tipologías y evaluar la influencia del tipo de registro sísmico y de las variaciones constructivas.

Al contrastar los resultados con la amenaza sísmica local del AMBA, se observan diferencias significativas en el comportamiento estructural según el tipo de registro sísmico considerado. Mientras que para registros representativos de regiones de corteza activa las probabilidades de excedencia del estado de daño leve resultan extremadamente reducidas, el escenario cambia al considerar registros asociados a regiones continentales estables, más representativos del entorno geológico local, los cuales inducen mayores niveles de demanda. Al considerar los niveles de demanda sísmica representativos para estructuras de período corto en el AMBA, el Modelo Precario presenta probabilidades de daño leve entre tres y cuatro veces mayores que el Modelo Reforzado. En el caso del estado de daño moderado, las diferencias relativas resultan aún más marcadas, alcanzando valores del orden de cinco veces para registros SCR y llegando a varios órdenes de magnitud en el caso de registros ACR. Estos resultados evidencian que, si bien las probabilidades de daño asociadas a la amenaza sísmica regional pueden ser bajas en términos absolutos para ciertos escenarios, las tipologías precarias presentan valores significativamente superiores a los correspondientes a estructuras adecuadamente diseñadas, que son las habitualmente consideradas en modelos convencionales de riesgo. Esta mayor vulnerabilidad se manifiesta en la aparición del daño a menores niveles de intensidad y en una mayor variabilidad de la respuesta, particularmente en los niveles más avanzados, lo que puede conducir a una subestimación del riesgo cuando estas tipologías no son adecuadamente representadas.

En este marco, la combinación de tipologías constructivas informales con deficiencias en su configuración estructural da lugar a un escenario de riesgo relevante frente a la ocurrencia de eventos locales de período corto. El Modelo Precario evidencia una marcada susceptibilidad a desarrollar daños dentro del rango de intensidades esperadas en la región, mientras que el Modelo Intermedio introduce mejoras limitadas que no logran disminuir sustancialmente la vulnerabilidad. Esto sugiere que

una reducción efectiva requiere intervenciones integrales y no parciales, como se observa en el comportamiento del Modelo Reforzado, que desplaza los umbrales de daño hacia niveles mayores y reduce de manera significativa las probabilidades de excedencia, especialmente para el estado de daño moderado. Como consideración adicional, cabe señalar que, si las condiciones constructivas del Modelo Precario se encauzaran formalmente bajo los lineamientos de los reglamentos CIRSOC 501¹⁵ e INPRES-CIRSOC 103 – Parte III¹⁶, el sistema podría responder como una mampostería confinada adecuada, con un comportamiento conjunto de los muros y los elementos de confinamiento. La relevancia de estas diferencias se acentúa al considerar la escala urbana del AMBA. Hace más de un siglo, al momento del sismo del Río de la Plata de 1888, la población de la región era del orden de 500.000 habitantes, es decir, aproximadamente un 3% de la actual. En la actualidad, aun cuando la peligrosidad sísmica no haya variado significativamente, el crecimiento sostenido de la población y la alta densidad de edificaciones implica que eventos de características similares, incluso probabilidades individuales bajas, pueden traducirse en un número significativo de estructuras afectadas. Aunque los estados de daño más probables para la sismicidad esperada en la región son leve y moderado, estos pueden implicar consecuencias económicas significativas en el contexto de los barrios populares. El daño moderado, aun sin comprometer la estabilidad global, puede exceder la capacidad de reparación de los habitantes, favoreciendo procesos de deterioro progresivo que incrementan la vulnerabilidad estructural de la vivienda a futuro. Desde esta perspectiva, el incremento relativo de la probabilidad de daño en tipologías precarias, respecto de estructuras diseñadas conforme a criterios reglamentarios, refuerza la importancia de caracterizar adecuadamente su vulnerabilidad dentro del contexto urbano.

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas líneas de investigación para profundizar el presente estudio. Entre ellas, resulta de interés ampliar el análisis a un conjunto más representativo de tipologías estructurales de vivienda informal en el AMBA, a fin de capturar la variabilidad constructiva y su influencia en la respuesta sísmica. En particular, resultaría relevante incorporar sistemas de mampostería confinada ejecutados conforme a criterios reglamentarios, los cuales podrían presentar mecanismos resistentes diferentes y alcanzar mayores capacidades de deformación antes del colapso, con distorsiones de entrepiso del orden de 1,2 % a 1,5 %. La comparación de esta tipología con la analizada en el presente trabajo permitiría evaluar la influencia del sistema constructivo sobre la respuesta sísmica y la vulnerabilidad de las viviendas informales. En la misma línea, una caracterización más detallada de la amenaza para períodos cortos, mediante modelos más refinados, permitiría reducir las incertidumbres asociadas a la demanda sísmica. La incorporación de mecanismos de falla no considerados, como el colapso fuera del plano de los muros, contribuiría a una evaluación más integral del desempeño estructural. Finalmente, el desarrollo de análisis de sensibilidad sobre parámetros mecánicos y geométricos permitiría evaluar su incidencia en la respuesta estructural y en la definición de las curvas de fragilidad.

Referencias

1. INTI. "Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes Parte II." Buenos Aires, Argentina, 2021.
2. Bertero, R. D., S. Vaquero, J. M. Mussat, and A. Bertero. "Seismic hazard in Buenos Aires, Argentina: A preliminary study on the effects of long-distance earthquakes on tall buildings." *Journal of South American Earth Sciences* 81 (2018): 2335–2344.
3. Bertero, Agustín, y Raul Bertero. «Seismic hazard in Buenos Aires, Argentina, considering the influence of site effects and long-distance earthquakes.» *Journal of South American Earth Sciences* 117 (2022): 103899.
4. ReNaBaP, Registro Nacional de Barrios Populares. Informe Anual de Barrios Populares. Buenos Aires, Argentina: Ministerio de Desarrollo Social de la Nación Argentina, 2023.
5. Vamvatsikos, D., y C. A. Cornell. «Incremental dynamic analysis.» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* 31 (2002): 491–514.
6. Baker, Jack W. «Efficient analytical fragility function fitting using dynamic structural analysis.» *Earthquake Spectra* 31 (2015): 579-599.
7. Pacific Earthquake Engineering Research Center. OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation. University of California, 2025.
8. Bertero, Agustín. «Diseño sísmico de edificios resilientes: evaluación probabilística de la performance ante terremotos de distinta intensidad.» Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires, 2021.
9. Kottke, Albert R, y Ellen M Rathje. Technical Manual for Strata. Berkeley, CA: Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER), 2009.
10. Bertero, Raúl, Sebastián Vaquero, y Juan Mussat. «Efectos de sismos distantes sobre edificios altos: riesgo sísmico en Buenos Aires.» *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural (JAIE)*, Buenos Aires, Argentina, 2016.
11. Hábitat para la Humanidad Argentina, TECHO, ProHábitat XXI. Ciclo de vida de la vivienda autoconstruida en Argentina. 2022.
12. INTI. «Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón.» Buenos Aires, Argentina, 2005.
13. Chrysostomou, Christis Zenon. Effects of Degrading Infill Walls on the Nonlinear Seismic Response of Two-Dimensional Steel Frames. Ithaca, New York: Cornell University , 1991.
14. INTI. «Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras.» Buenos Aires, Argentina, 2005.
15. INTI. «Reglamento Argentino de Estructuras de Mampostería.» Buenos Aires, Argentina, 2007.
16. INTI. "Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes Parte III." Buenos Aires, Argentina, 2018.