

7

Artículo de Investigación

Construcción de Curvas de Fragilidad Sísmica para Edificaciones de Pórticos de Hormigón Armado en Cuba

Construction Of Seismic Fragility Curves For Reinforced Concrete Frame Buildings In Cuba

Autores

Kenia Mercedes Leyva Chang

Ing. Civil ,MSc. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

kenia@cenais.cu

<https://orcid.org/0000-0002-7092-9179>

Grisel Morejón Blanco

Ing. Civil ,Dra. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas

grisel@cenais.cu

<https://orcid.org/0000-0001-7772-876X>

Eduardo Rafael Álvarez Deulofeu

Ing. Civil , Dr. Universidad de Oriente

ealvarez@uo.edu.cu

<https://orcid.org/0000-0003-1819-263x>

7

Artículo de Investigación

Construcción de Curvas de Fragilidad Sísmica para Edificaciones de Pórticos de Hormigón Armado en Cuba

Construction Of Seismic Fragility Curves For Reinforced Concrete Frame Buildings In Cuba

RESUMEN

Se presenta el primer procedimiento integral para la construcción de curvas de fragilidad sísmica específicas para edificaciones de pórticos de hormigón armado en Cuba. Se analizaron 297 variantes estructurales diseñadas bajo NC 46:1999 y NC 46:2017, incorporando propiedades mecánicas de aceros cubanos (G-40, A44) y condiciones sísmicas locales. Mediante Análisis Dinámico No Lineal con acelerogramas representativos escalados al Espectro de Peligro Uniforme cubano, se cuantificaron umbrales de daño basados en deriva máxima de piso. Los resultados muestran reducciones de hasta 60.3% en deriva para daño completo en estructuras NC 46:2017, evidenciando mejoras significativas en desempeño sísmico. La validación empírica con datos internacionales confirmó alta precisión ($R^2 = 0.976$). Las curvas obtenidas constituyen una herramienta probabilística robusta para la evaluación técnica de la vulnerabilidad sísmica y la revisión de normativas de diseño en Cuba.

Palabras claves: Curvas de fragilidad sísmica, pórticos de hormigón armado, Análisis Dinámico No Lineal, aceros cubanos, Norma NC 46, vulnerabilidad sísmica.

ABSTRACT

Is presented the first comprehensive procedure to generate specific seismic fragility curves for reinforced concrete frame buildings in Cuba. A total of 297 structural variants designed under NC 46:1999 and NC 46:2017 regulations were analyzed, incorporating mechanical properties of Cuban reinforcing steels (G-40, A44) and local seismic conditions. Using Nonlinear Dynamic Analysis with representative accelerograms scaled to match the Cuban Uniform Hazard Spectrum, damage thresholds were quantified based on maximum inter-story drift. Results show reductions of up to 60.3% in drift for complete damage state in NC 46:2017 structures, demonstrating significant improvements in seismic performance. Empirical validation using international data confirmed high accuracy ($R^2 = 0.976$). The resulting curves constitute a robust probabilistic tool for the technical evaluation of seismic vulnerability and the revision of design codes in Cuba.

Keywords: Seismic fragility curves, reinforced concrete frames, Nonlinear Dynamic Analysis, Cuban reinforcing steels, Cuban code NC 46, seismic vulnerability.

Nota Editorial: Recibido: 25 de Septiembre 2025 Aceptado: 14 de Octubre 2025

1. INTRODUCCIÓN

Las pérdidas humanas y materiales causadas por terremotos representan un desafío crítico para la ingeniería sísmica a nivel global. La experiencia internacional demuestra que el colapso de edificaciones es la causa principal de víctimas durante sismos severos, siendo posible estimar el número de afectados mediante la cuantificación de estructuras con daños significativos. En este contexto, la evaluación precisa de la vulnerabilidad estructural se convierte en un requisito indispensable para la reducción efectiva del riesgo sísmico.

A nivel internacional, el desarrollo de metodologías para la evaluación del riesgo sísmico ha evolucionado hacia enfoques probabilistas basados en desempeño estructural. Entre estas herramientas, las curvas de fragilidad han demostrado su eficacia para cuantificar la probabilidad de que una estructura exceda determinados estados de daño ante diferentes niveles de intensidad sísmica. Proyectos como Hazards United States (HAZUS) [1] han establecido estándares ampliamente utilizados para esta evaluación. Sin embargo, la aplicación directa de estos modelos genéricos en contextos específicos como Cuba presenta limitaciones significativas, debido fundamentalmente al uso de materiales locales con propiedades mecánicas particulares y el cumplimiento de normativas sismorresistentes nacionales.

La región oriental de Cuba, presenta una alta amenaza sísmica asociada al sistema de falla Oriente, capaz de generar eventos de magnitud superior a 7.0 Mw. Según el Servicio Sismológico Nacional, históricamente, esta región ha experimentado terremotos destructivos como los de 1766 (I = IX), 1852 (I = IX), 1932 (Ms = 6.75; I: VIII) y 1947 (Ms = 6.75; I: VII) en la ciudad de Santiago de Cuba y en 1976 (Ms = 5.7; I: VIII), 1992 (Ms = 7.0; I: VII) y 2024 (Ms = 6.7; I: VIII) en la provincia Granma. Esto, unido a que más del 50% del parque edificado está constituido por estructuras de hormigón armado, muchas de las cuales fueron diseñadas bajo normativas sismorresistentes obsoletas o con materiales de limitada ductilidad, evidencia la necesidad de realizar estimaciones precisas de riesgo sísmico.

Tradicionalmente, estas evaluaciones se han basado en metodologías internacionales como HAZUS [1], las cuales no consideran las particularidades de los materiales locales ni los requisitos específicos de las normativas nacionales. Investigaciones previas [2], [3] han demostrado que los aceros cubanos (G-40 y A44) presentan una ductilidad significativamente menor en comparación con los aceros norteamericanos, con una reducción del 81% en alargamiento máximo y del 86% en tenacidad (ver Figura 1). Estas diferencias impactan directamente la capacidad de disipación de energía y la formación de rótulas plásticas en los elementos estructurales.

Esta limitación en las propiedades mecánicas de los materiales, combinada con la evolución en los requisitos normativos, introduce incertidumbres significativas en la estimación de la vulnerabilidad sísmica. Por tanto, el objetivo de esta investigación es desarrollar curvas de fragilidad sísmica específicas para edificaciones cubanas de pórticos de hormigón armado mediante análisis no lineales que consideren las propiedades inelásticas del acero cubano y los niveles de diseño establecidos en las normativas NC 46 [4], [5], lo cual permitirá reducir las incertidumbres actuales en la estimación del riesgo sísmico. Este trabajo se centra en el desarrollo y validación del procedimiento analítico completo, estableciendo las bases técnicas para futuras aplicaciones en evaluación de riesgo sísmico a nivel estructural.

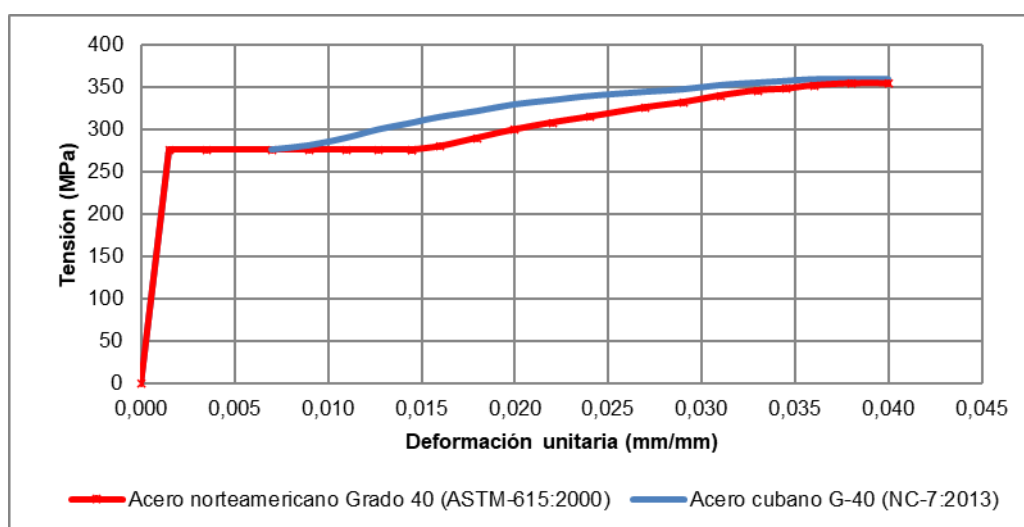


Fig. 1- comparación entre el acero norteamericano y el cubano. [Elaboración propia].

2. METODOLOGÍA

Las curvas de fragilidad permiten cuantificar la probabilidad de que una estructura exceda distintos márgenes de seguridad ante movimientos sísmicos de intensidad variable. Para su construcción, es necesario evaluar la respuesta no lineal de las edificaciones que conforman la muestra para el estudio, se parte de la obtención de variantes de edificios diseñados para los códigos sismorresistentes implementados en Cuba a partir de 1999, emplazadas en zonas de alta sismicidad. Se aplica un procedimiento de pre dimensionamiento sísmico de secciones de los elementos estructurales de las variantes analizadas a partir de las consideraciones de cada código. Se propone el uso del método de análisis dinámico no lineal.

Para construir las curvas de fragilidad existen tres metodologías bien consolidadas: basadas en las observaciones de campo, por la opinión de expertos y los métodos analíticos [6]. Los métodos empíricos y de expertos son inviables en Cuba por la falta de datos sistematizados de daños sísmicos. Proyectos como HAZUS o An Advanced Approach to Earthquake Risk Scenarios with Applications to Different European Towns (RISK-UE) [7] no incorporan particularidades locales como la degradación de materiales o la baja ductilidad del acero cubano, por lo que su utilización en Cuba, conlleva a subestimar la vulnerabilidad. Teniendo en cuenta estas consideraciones, se selecciona el análisis dinámico no lineal para generar curvas de fragilidad en el contexto cubano. Su efectividad depende de los modelos constitutivos que reflejen fielmente las propiedades mecánicas de los materiales locales (acero G-40/A44), la incorporación explícita de incertidumbres estructurales y sísmicas y el uso de acelerogramas representativos de la sismicidad de las fallas activas cubanas.

Las curvas de fragilidad están caracterizadas por los valores medios y de desviación estándar logarítmica normal de la demanda sísmica del suelo. Los valores medios de la fragilidad de los componentes estructurales se basan en las proporciones de deriva del edificio que describen el umbral de los estados de daño.

La variabilidad total o desviación estándar se modela mediante la combinación de tres contribuciones a la variabilidad del daño estructural: la variabilidad total del estado de daño estructural, la variabilidad de la curva de capacidad y la variabilidad del espectro de demanda.

A continuación, se propone una metodología para derivar curvas de fragilidad aplicables a pórticos de hormigón armado diseñados en Cuba bajo los requisitos normativos vigentes desde 1999. El esquema metodológico propuesto (Figura 2) está estructurado en cuatro etapas fundamentales. Cada una de ellas comprende procesos específicos que garantizan la confiabilidad y la validación de los resultados obtenidos.

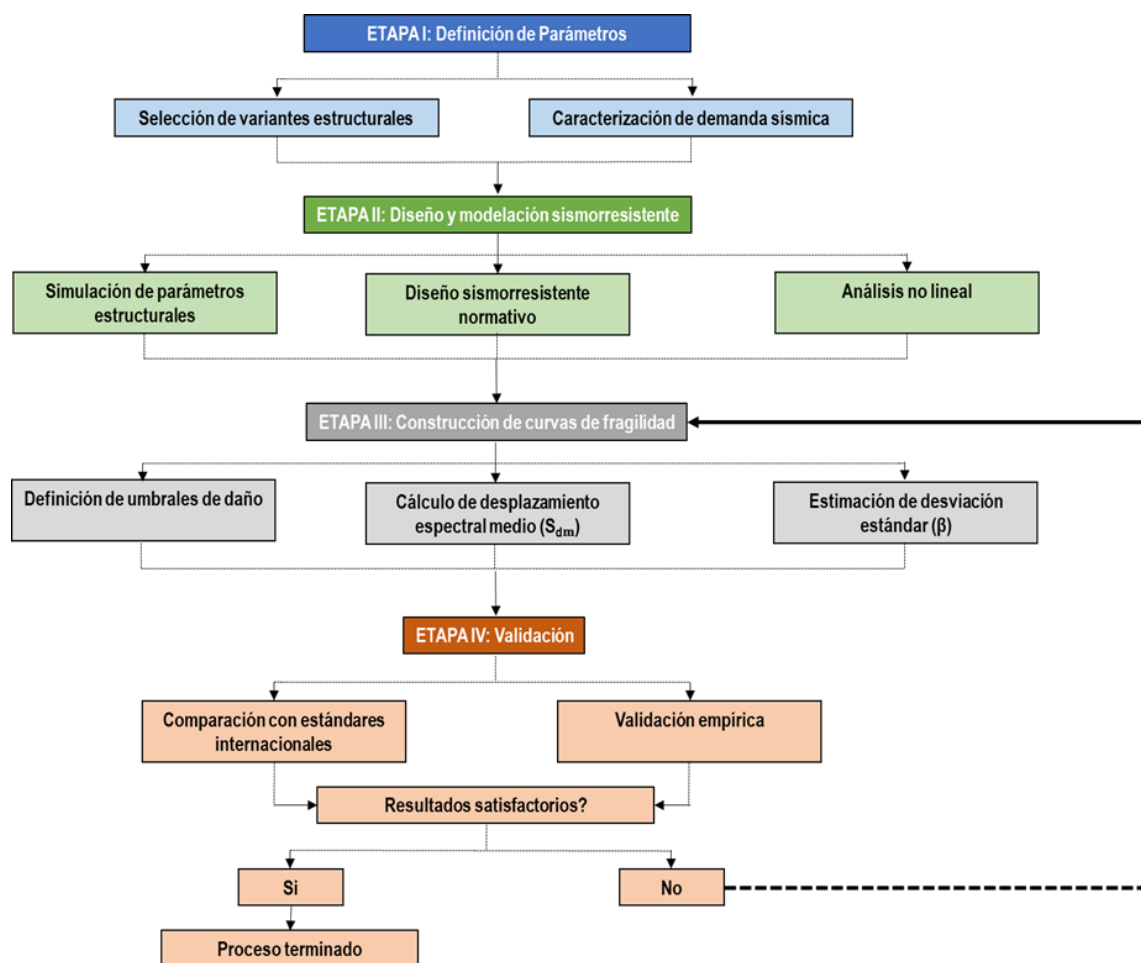


Fig. 2- Procedimiento para la construcción de las curvas de fragilidad.

Etapa I. Definición de parámetros: Esta etapa establece las bases para el desarrollo del estudio, mediante la selección y caracterización de los elementos estructurales y las condiciones sísmicas a considerar. Esta fase es crucial para garantizar que los modelos representen adecuadamente la respuesta estructural ante eventos sísmicos.

- Selección de variantes estructurales considerando diferentes configuraciones.
- Caracterización de la demanda sísmica mediante registros de sismos reales registrados en el área de estudio y sismos internacionales registrados en zonas con características sismotectónicas similares a la región oriental de Cuba, espectros de respuesta o generación de movimientos sísmicos sintéticos.

Se desarrolló un conjunto de 297 variantes estructurales representativas del parque edificado cubano. Los materiales considerados incluyeron hormigón de 17.5 MPa y 35.0 MPa según normativa, y aceros cubanos G-40 y A44, las principales características se muestran a continuación

- 185 variantes diseñadas bajo NC 46:2017
- 112 variantes diseñadas bajo NC 46:1999
- Rango de alturas: 2-5 pisos (clasificados como baja altura: 2-3 pisos, media altura: 4-5 pisos)
- Configuraciones en planta: 2-5 luces en dirección longitudinal
- Puntales: 2.60-4.20 m según normativa
- Hormigón: Se utilizó el modelo constitutivo de Mander para hormigón confinado, considerando el efecto del refuerzo transversal en la ductilidad.
- Acero: Se implementaron modelos trilineales basados en ensayos experimentales de aceros cubanos, incorporando endurecimiento por deformación y degradación bajo carga cíclica.

Se seleccionaron 7 registros sísmicos (4 internacionales y 3 cubanos) representativos de los escenarios de amenaza para Santiago de Cuba. Los acelerogramas fueron escalados utilizando SeismoMatch para lograr compatibilidad espectral con el Espectro de Peligro Uniforme de Cuba, con un error cuadrático medio ≤ 0.30 . Los sismos seleccionados son:

- Registros internacionales: Kocaeli (1999), Landers (1992), El Centro (1940), Northridge (1994)
- Registros cubanos: 2010, 2016, 2024

Etapa II. Diseño y modelación sismorresistente: En esta etapa, se desarrollan y ajustan los modelos numéricos para evaluar su desempeño bajo cargas sísmicas.

- Simulación de parámetros estructurales, donde se realiza en diseño sismorresistente basado en la normativa vigente y la numeración numérica considerando comportamiento no lineal de materiales y geometrías [8].
- Implementación de análisis dinámico no lineal (Time-History) a partir del software SAP 2000 v22.0 [9]. Cada variante estructural fue sometida a análisis incremental con intensidades crecientes hasta alcanzar el colapso, monitorizando derivas máximas de piso y formación de rótulas plásticas.
- Calibración de los modelos mediante comparación con resultados experimentales o referencias teóricas.
- Identificación de posibles modificaciones en los parámetros iniciales para mejorar la precisión de las simulaciones.

Etapa III. Construcción de Curvas de Fragilidad: Esta etapa proporciona una herramienta probabilística fundamental para la evaluación de riesgo sísmico.

- Definición de umbrales de daño y establecimiento de criterios para daño ligero, moderado, severo y colapso, basados en desplazamientos, derivas o deformaciones plásticas. Se adoptan los umbrales de Ghobarah et al. [10] con ajustes de Aguiar y Bobadilla [11], por su conservadurismo y validación en entornos con tipologías y materiales similares a los cubanos (ver Tabla 1).
- Cálculo de desplazamiento espectral medio (S_{em})
- Determinación de la capacidad de desplazamiento asociada a cada estado límite.
- Estimación de desviación estándar (β)

Tabla 1- Umbrales de daño.

Estado de Daño	Deriva (%)	Descripción
Leve	0,2 - 0,5	Agrietamiento en elementos no estructurales
Moderado	0,5 - 1,1	Fluencia inicial en elementos estructurales
Grave	1,1 - 2,3	Pérdida de capacidad portante
Completo	> 2,3	Colapso parcial o total

Las curvas se modelaron como funciones de distribución lognormal: $P[d_s/s_d] = \phi \left[\frac{1}{\beta_{ds}} \ln \left(\frac{s_d}{s_{d,ds}} \right) \right]$, donde: $S_{d,ds}$ es la mediana del desplazamiento espectral para el estado de daño ds , β_{ds} la desviación estándar logarítmica y ϕ la función de distribución normal estándar acumulativa.

Etapas IV. Validación: La verificación de los resultados es esencial para asegurar la confiabilidad de la metodología propuesta. La validación del procedimiento se realiza mediante dos enfoques complementarios:

- Comparación con curvas de fragilidad estandarizadas: Se contrastan los resultados con las curvas de referencia propuestas por HAZUS para tipologías estructurales análogas, considerando normativas sismorresistentes equivalentes.
- Análisis espectral y verificación empírica: Se generan los espectros de respuesta de los acelerogramas internacionales utilizados (terremotos de Haití en 2021, Ecuador en 2016, México en 2017 y Puerto Rico 2020) y se comparan con los espectros de registros reales de Cuba y el espectro de peligro uniforme de Cuba. Esta comparación, explicada íntegramente en el capítulo 3, permite evaluar la consistencia entre los niveles de daño estimados y los observados en dichos eventos históricos.
- Evaluación de resultados: Si los resultados son satisfactorios, se procede a la conclusión del estudio. De no ser así, se revisan las etapas anteriores para ajustar parámetros o metodologías.

Se incorporaron incertidumbres mediante simulación de Monte Carlo, considerando variabilidad en:

- Propiedades de materiales (COV = 10-15%)
- Dimensiones geométricas (COV = 3-5%)
- Acción sísmica (7 acelerogramas representativos)

3. RESULTADOS

Las normativas utilizadas (NC 46:1999 y NC 46:2017) definen dos filosofías constructivas contrastantes: NC 46:1999 prioriza economía con secciones mínimas, mientras NC 46:2017 exige ductilidad estructural mediante confinamiento, jerarquía resistente y control de disipación de energía, en la **Tabla 2** se presentan las principales características de cada norma que inciden en el diseño sismorresistente de las variantes seleccionadas. En la Tabla 3 se definen las principales características del diseño de las variantes de edificaciones de pórticos de hormigón armado diseñadas bajo las normativas NC 46:1999 y NC 46:2017. Se detallan geometrías, disposiciones de refuerzo y criterios sismorresistentes aplicados a edificios de 2-3 y 4-5 pisos, representativos de la práctica constructiva nacional.

Tabla 2- Diferencias fundamentales entre NC 46:1999 y NC 46:2017 en el diseño sismorresistente. [Elaboración propia.]

Aspecto Crítico	NC 46:1999	NC 46:2017	Consecuencias/Mejoras
Jerarquía resistente	Ausencia de criterio "columna fuerte-viga débil"	$\sum M_{nc} \geq 1.20 \sum M_{nb}$	1999: Fallas en nudos y colapso localizado. 2017: Plasticidad controlada en vigas (elementos reparables).
Confinamiento	Estribos simples @ a más de 20 cm	Cercos dobles @ 10 cm (zonas críticas)	1999: Pandeo prematuro de acero long. ($\beta \leq 2.0$). 2017: Ductilidad garantizada ($\beta \geq 5.0$).
Control de derivas (%)	$[\Delta_U] = 1.5\% \frac{h}{R_d}$	$[\Delta_U] = 0.025 h_p$	1999: Daños no estructurales severos. 2017: Limita daños en tabiquería y fachadas.
Verificación estados	Resistencia última únicamente	Estados límite de servicio sísmico (FEMA 356)	1999: Sobredimensionamiento ineficiente. 2017: Diseño óptimo con desempeño garantizado.

Tabla 3- Límites de diseño por norma y altura.

Elemento	Parámetro	Variante	NC 46:1999	NC 46:2017
Columnas	Sección	2-3 pisos	30×30 cm (constante)	40×40 cm (mín)
		4-5 pisos	1-2: 40×40 cm; 3-5: 35×35 cm	75×75 cm (máx)
	Acero long.	Diámetro mín/máx	ϕ #5 (mín); $p_{min} \approx 0.01$	ϕ #5 (mín); $p_{min} \approx 0.01$; $p_{max} \approx 0.06$
		Cantidad	4 barras	8 barras (mín), 16 barras (máx)
	Estribos	Diámetro	ϕ #3	ϕ #3
		Espaciamiento (mín/máx)	20 cm	Zonas críticas: 10 cm No críticas: 15 cm
			Cercos simples	Cercos dobles
Vigas	Sección	2-3 pisos	Rectangular: 30×35 cm	En T: Alma 20×25 cm; (mín) Ala 58×13 cm (mín)
		4-5 pisos	En T: Alma 40×45 cm; Ala 73×12 cm (mín)	En T: Alma 20×25 cm; (mín) Ala 58×13 cm (mín)
	Acero long.	Diámetro mín/máx	ϕ #5 $p_{min} \approx 0.0033$	ϕ #5 $p_{min} \approx 0.0033$
		Cantidad en apoyo	3 (tracción) y 2 (compresión)	3 (tracción) y 2 (compresión)
	Estribos	Diámetro	ϕ #3	ϕ #3
		Espaciamiento (mín/máx)	20 cm	Zonas críticas: 10 cm (máx) No críticas: 15 cm (máx)
		Configuración	Cercos simples	Cercos simples
Criterios	Derivas	Límite máximo	$[\Delta_U] = 1.5\% \frac{h}{R_d}$ (h: altura de piso, R_d : Coeficiente reducción)	$[\Delta_U] = 0.025h_p$ (h_p : altura de piso)
	Confinamiento	Longitud crítica	No aplica	Columnas: max (h, $\frac{h}{6}$, 450 mm) Vigas: 2h
	Nudos	$\sum M_{nc} \geq 1.20 \sum M_{nb}$	No requerido	≥ 1.2 en nudos

El daño estructural se cuantificó y clasificó en función de las derivas máximas de piso calculadas en los puntos de control de cada edificio durante el Análisis Dinámico No Lineal. Estas derivas se correlacionaron directamente con los cuatro niveles de daño predefinidos. Inicialmente, el estudio consideró una muestra de 240 variantes de edificaciones. Sin embargo, un análisis estadístico de los resultados preliminares indica que esta muestra inicial no cumple con los requisitos estadísticos exigidos, por consiguiente, se procede a ampliar significativamente el tamaño de la muestra (57 variantes) para garantizar la fiabilidad de los resultados y su validez dentro del marco normativo.

Los resultados presentados en la Tabla 4 revelan diferencias significativas en el comportamiento sísmico de las estructuras según la normativa aplicada. Para baja altura, se observa una reducción del 60.3% en la deriva máxima en estado de daño completo (DC), los valores descienden de 7.83% (NC 46:1999) a 3.11% (NC 46:2017). Esta disminución refleja diseños con mayor rigidez y capacidad de limitar distorsiones de entre pisos durante eventos extremos, reduciendo vulnerabilidades en elementos no estructurales y mejorando la estabilidad global.

En estructuras de media altura, aunque los desplazamientos máximos en daño grave (DG) aumentan un 8.1% (20.92 cm vs. 19.35 cm), las derivas se reducen un 32% (1.36% vs. 2.00%). Esta aparente dicotomía indica que las soluciones bajo NC 46:2017 logran una distribución más eficiente de las deformaciones plásticas, priorizando el control de la distorsión global sobre el desplazamiento absoluto. El incremento del periodo fundamental en DC (1.12 s vs. 1.00 s) reflejan una mayor consideración de los modos superiores de vibración en el diseño actual, lo que se traduce en derivas más contenidas y un comportamiento estructural más predecible ante cargas sísmicas severas.

Tabla 4- Parámetros límites obtenidos del ADNL por norma y altura.

Norma	NC 46:2017											
Altura	Baja altura						Moderada altura					
Parámetro/ Daño	T (seg)		d _{max} (cm)		γ _{max} (%)		T (seg)		d _{max} (cm)		γ _{max} (%)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Leve	0,28	0,53	4,08	6,76	0,53	0,70	0,46	0,58	6,04	10,34	0,60	0,70
Moderado	0,27	0,65	3,92	10,54	0,71	0,98	0,50	0,78	6,35	17,14	0,71	1,00
Grave	0,64	0,82	10,97	18,31	1,03	1,99	0,61	0,79	11,94	20,92	1,01	1,36
Completo	0,77	1,00	12,65	19,37	2,05	3,11	0,90	1,12	25,43	30,75	2,00	2,45
Norma	NC 46:1999											
Altura	Baja altura						Moderada altura					
Parámetro/ Daño	T (seg)		d _{max} (cm)		γ _{max} (%)		T (seg)		d _{max} (cm)		γ _{max} (%)	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Leve	0,16	0,29	1,28	3,92	0,38	0,70	0,31	0,41	4,25	4,80	0,62	0,70
Moderado	0,28	0,44	2,85	4,21	0,80	1,00	0,37	0,50	4,56	7,63	0,70	0,94
Grave	0,34	0,74	3,73	7,22	1,03	1,99	0,45	0,78	6,41	19,35	1,03	2,00
Completo	0,47	0,89	0,10	22,02	0,02	7,83	0,59	1,00	13,99	21,33	2,07	2,94

Para la construcción de las curvas de fragilidad, el tamaño muestral del ADNL, aunque representativo para estimar la media, resulta insuficiente para caracterizar robustamente la dispersión del daño, dada la alta variabilidad de materiales y prácticas constructivas cubanas, por esta razón la desviación estándar se adoptó del proyecto HAZUS ajustado a Cuba, garantizando que la dispersión refleje: (a) datos empíricos de sismos reales, (b) propiedades mecánicas validadas de materiales locales, y (c) incertidumbres sistémicas no contempladas en modelos numéricos.

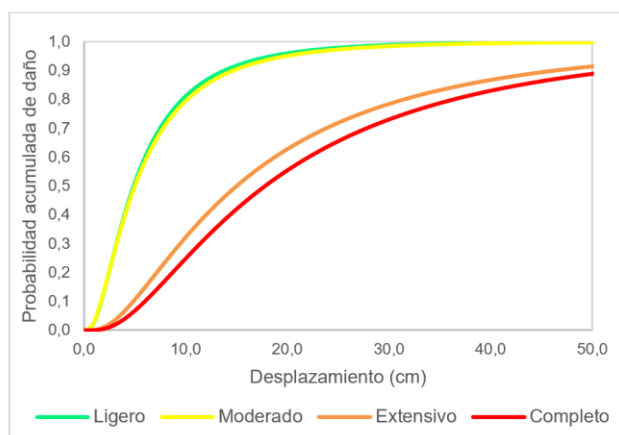
Al adoptar la desviación estándar de HAZUS ajustada a los materiales y condiciones constructivas cubanas, sigues este principio: La dispersión utilizada refleja la variabilidad observada en sistemas estructurales análogos bajo sismos reales, corregida por condiciones locales, superando así la incertidumbre estadística de muestras pequeñas. Sobre esta base se ajustó la desviación estándar como sigue:

- Se calcula la desviación estándar de los datos obtenidos del ADNL para cada grupo de datos.
- Se cuantifican las propiedades del acero cubano y se comparan con las del acero norteamericano a partir de la curva tensión deformación, teniendo en cuenta que: la ductilidad (deformación máxima) del acero cubano es ~16.7% menor que la del norteamericano (10% vs. 12%). Igualmente, hay que considerar que a pesar que la resistencia (f_{max}/f_y) de ambos aceros es casi idéntica, el acero cubano alcanza su deformación máxima antes.
- Aplicar corrección basada en HAZUS.

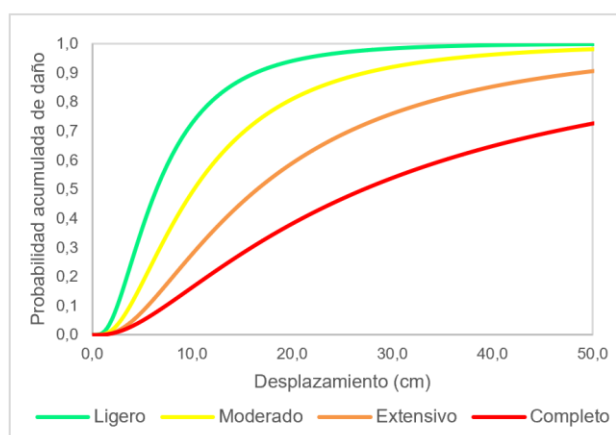
En la Tabla 5 se presentan los parámetros que describen las curvas de fragilidad ($S_{d,ds}$ y β_{ds}) para edificaciones de pórticos de hormigón armado diseñadas con la NC 46:2017 y la NC 46:1999 respectivamente y la Figura 3 muestra las curvas de fragilidad.

Tabla 5- Parámetros $S_{d,ds}$ y β_{ds} para estructuras de pórticos de hormigón armado diseñadas con la NC 46.

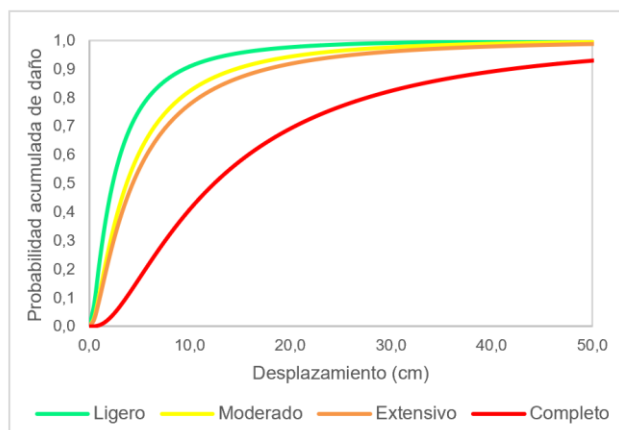
Norma de diseño / Estado de daño	NC 46:2017		NC 46:1999	
	Baja altura ($S_{d,ds}$; β_{ds})	Media altura ($S_{d,ds}$; β_{ds})	Baja altura ($S_{d,ds}$; β_{ds})	Media altura ($S_{d,ds}$; β_{ds})
Leve	(4,92; 0,81)	(6,44; 0,73)	(2,35; 1,09)	(4,45; 0,90)
Moderado	(5,04; 0,84)	(10,18; 0,77)	(3,73; 1,07)	(7,01; 0,86)
Grave	(15,04; 0,88)	(16,53; 0,85)	(4,34; 1,10)	(10,73; 0,92)
Completo	(17,86; 0,85)	(27,18; 1,02)	(12,45; 0,95)	(19,36; 1,00)



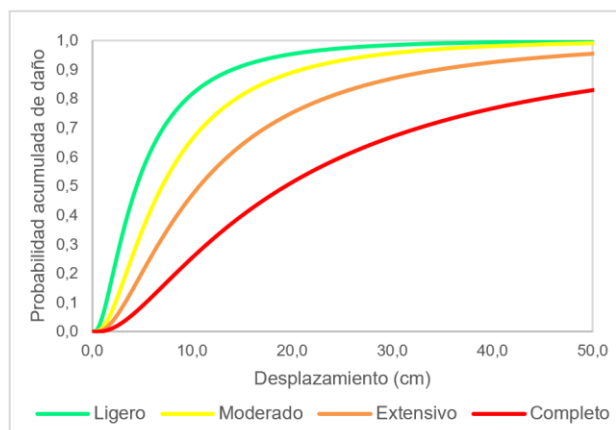
a) Baja altura diseñada con la NC 46:2017



b) Media altura diseñada con la NC 46:2017



c) Baja altura diseñada con la NC 46:1999



d) Media altura diseñada con la NC 46:1999

Fig. 3- Curvas de fragilidad para edificaciones de pórticos de hormigón armado diseñadas con la NC 46,

La validación empírica de las curvas de fragilidad se realiza mediante el contraste estadístico entre los daños predichos por el modelo y los observados en registros sísmicos reales para daños completos. Este proceso evalúa la solidez predictiva del análisis mediante métricas de error (MAE, MAPE, RMSE), análisis de correlación (R^2) y pruebas de significancia (prueba t, ANOVA). Adicionalmente, se examina la sensibilidad del modelo ante variables clave como el tipo de normativa sismorresistente, la altura de las estructuras y las características de los eventos sísmicos, con el fin de identificar dominios de aplicabilidad y limitaciones.

En la Tabla 6 se presentan los estadísticos descriptivos globales, la validación global de las curvas de fragilidad muestra un ajuste estadístico robusto a nivel global. La alta correlación lineal ($r = 0.993$, $p < 0.001$) y coeficiente de determinación ($R^2 = 0.976$) indican que las curvas desarrolladas explican el 97.6% de la variabilidad observada en los datos reales. Los errores de predicción se mantienen dentro de rangos aceptables para ingeniería sísmica, confirma que las curvas siguen fielmente la tendencia de los datos, con mínimos sesgos sistemáticos. Visualmente, el gráfico de dispersión (Figura 4) evidencia la alineación de los puntos sobre la línea identidad ($y=x$), particularmente en valores bajos y medios (<25 unidades). Los errores de predicción son:

- MAE (Error Absoluto Medio): 1.57 unidades
- MAPE (Error Porcentual Absoluto Medio): 14.3%
- RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio): 2.07

Tabla 6- Estadísticos descriptivos globales.

Variable	n	Media	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
Predicho	14	14,52	8,93	4,67	30,17	7,43	11,03	21,93
Observado	14	14,29	9,11	5,00	35,00	7,50	10,00	22,50
Error Ab	14	1,57	1,58	0,00	4,83	0,32	1,00	2,50

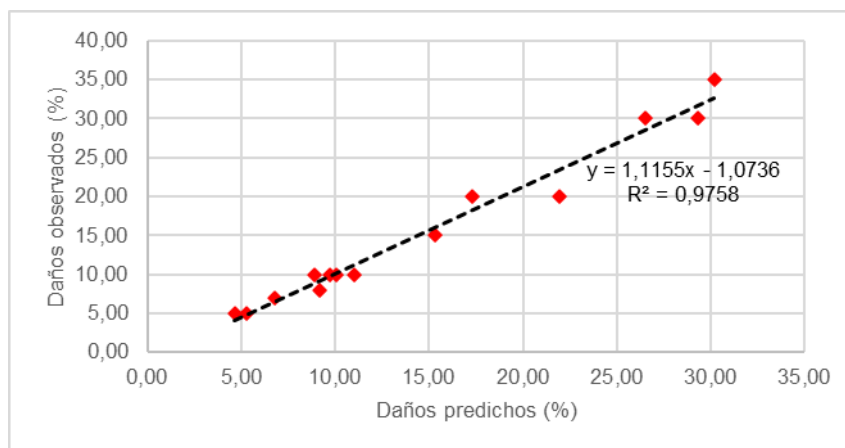


Fig. 4- Daños predichos vs. observados (daños completos) ($R^2 = 0.976$)

Al dividir por norma de diseño, se identifican diferencias críticas: Las curvas para estructuras diseñadas con la NC 46:2017 presentan precisión excepcional ($MAE=0.62$, $MAPE=7.2\%$), con errores inferiores al 10% en todos los terremotos analizados. En cambio, las curvas para estructuras diseñadas con la NC 46:1999 muestran desviaciones significativas ($MAE=2.28$, $MAPE=18.3\%$), subestimando el daño observado (prueba t: $p=0.009$) (Tabla 7). Este patrón sugiere que el modelo actual responde eficientemente al comportamiento de estructuras dúctiles, pero requiere recalibración mínima para edificaciones no dúctiles con detalles sismorresistentes obsoletos.

Tabla 7- Análisis por categorías: Por normas de diseño.

Diseño	MAE	RMSE	MAE (%)	n
NC 46:2017 (estructuras dúctiles)	0,62	0,78	7,2	6
NC 46:1999 (estructuras no dúctiles)	2,28	2,72	18,3	8

La Tabla 8 presenta los errores de predicción segmentados por altura de las estructuras. Los edificios bajos ($n=8$) muestran un MAE de 1.64 unidades ($MAPE=15.6\%$), mientras que las estructuras medianas ($n=6$) registran un MAE ligeramente inferior de 1.48 unidades ($MAPE=12.9\%$). El análisis ANOVA confirma que estas diferencias no son estadísticamente significativas ($F=0.08$; $p=0.78$), indicando que la precisión del modelo es consistente independientemente de la altura de las estructuras evaluadas.

Tabla 8- Análisis por categorías: Por rangos de altura de las edificaciones.

Altura	MAE	RMSE	MAE (%)	n
Baja (1 – 3 pisos)	1,64	2,11	15,6	8
Media (4 – 5 pisos)	1,48	1,99	12,9	6

En cuanto a la validación por evento sísmico, se observa que la respuesta predictiva del modelo presenta variaciones significativas según el terremoto considerado. Para los sismos de Puerto Rico (2020) y México (2017), las curvas muestran una alta precisión ($MAPE \approx 6.5\%$ y 5.6% , respectivamente), lo que valida su aplicabilidad en contextos sismotectónicos afines a la región oriental de Cuba. Por otro lado, si bien se registran mayores discrepancias en los sismos de Ecuador (2016) y Haití (2021), con $MAPE$ del 10.7% y 8.0% , respectivamente, estos valores reflejan un ajuste aceptable en términos de Ingeniería Sísmica, aunque se identifican subestimaciones moderadas en estructuras no dúctiles. Este comportamiento sugiere limitaciones en la modelación referentes a: (a) efectos de sitio en suelos blandos, y (b) mecanismos de falla superficial no incluidos en las curvas actuales (Tabla 9).

Tabla 9- Análisis por categorías: Por terremoto.

Terremoto	MAE	RMSE	MAE (%)	n
Puerto Rico, 2020	0,50	0,60	6,5	4
México, 2017	0,83	1,10	5,6	4
Haití, 2021	2,75	3,45	8,0	2
Ecuador, 2016	1,89	2,28	10,7	4

4. DISCUSIÓN

Del análisis comparativo de las curvas de fragilidad obtenidas en cuanto a la altura de las edificaciones y las normas de diseño se concluye que:

- Estructuras de media altura muestran mayores valores medios (ej: 27.18 vs. 17.86 en las edificaciones diseñadas con la NC 46:2017 para daño completo), evidenciando mejor desempeño sísmico. Igualmente, presentan mayor dispersión en el umbral de daños completos (1.02 vs. 0.85), debido a efectos de modos superiores y P-Delta.
- Las edificaciones diseñadas con la NC 46:2017 reduce daños, pero aumenta incertidumbre en colapso, por mayor complejidad estructural. En cambio, las edificaciones diseñadas con la NC 46:1999 tiene mayores daños, pero similar incertidumbre en daño completo (0.95-1.00).

Al dividir por norma de diseño, se identifican diferencias críticas: Las curvas para estructuras diseñadas con la NC 46:2017 presentan precisión excepcional (MAE=0.62, MAPE=7.2%), con errores inferiores al 10% en todos los terremotos analizados. En cambio, las curvas para estructuras diseñadas con la NC 46:1999 muestran desviaciones significativas (MAE=2.28, MAPE=18.3%), subestimando el daño observado (prueba t: $p=0.009$) (**Tabla 7**). Este patrón sugiere que el modelo actual responde eficientemente al comportamiento de estructuras dúctiles, pero requiere recalibración mínima para edificaciones no dúctiles con detalles sismorresistentes obsoletos.

Tabla 7- Análisis por categorías: Por normas de diseño.

Diseño	MAE	RMSE	MAE (%)	n
NC 46:2017 (estructuras dúctiles)	0,62	0,78	7,2	6
NC 46:1999 (estructuras no dúctiles)	2,28	2,72	18,3	8

La Tabla 8 presenta los errores de predicción segmentados por altura de las estructuras. Los edificios bajos ($n=8$) muestran un MAE de 1,64 unidades (MAPE=15,6%), mientras que las estructuras medianas ($n=6$) registran un MAE ligeramente inferior de 1,48 unidades (MAPE=12,9%). El análisis ANOVA confirma que estas diferencias no son estadísticamente significativas ($F=0,08$; $p=0,78$), indicando que la precisión del modelo es consistente independientemente de la altura de las estructuras evaluadas.

Tabla 8- Análisis por categorías: Por rangos de altura de las edificaciones.

Altura	MAE	RMSE	MAE (%)	n
Baja (1 – 3 pisos)	1,64	2,11	15,6	8
Media (4 – 5 pisos)	1,48	1,99	12,9	6

En cuanto a la validación por evento sísmico, se observa que la respuesta predictiva del modelo presenta variaciones significativas según el terremoto considerado. Para los sismos de Puerto Rico (2020) y México (2017), las curvas muestran una alta precisión (MAPE \approx 6.5% y 5.6%, respectivamente), lo que valida su aplicabilidad en contextos sismotectónicos afines a la región oriental de Cuba. Por otro lado, si bien se registran mayores discrepancias en los sismos de Ecuador (2016) y Haití (2021), con MAPE del 10.7% y 8.0%, respectivamente, estos valores reflejan un ajuste aceptable en términos de Ingeniería Sísmica, aunque se identifican subestimaciones moderadas en estructuras no dúctiles. Este comportamiento sugiere limitaciones en la modelación referentes a: (a) efectos de sitio en suelos blandos, y (b) mecanismos de falla superficial no incluidos en las curvas actuales (Tabla 9).

Tabla 9- Análisis por categorías: Por terremoto.

Terremoto	MAE	RMSE	MAE (%)	n
Puerto Rico, 2020	0,50	0,60	6,5	4
México, 2017	0,83	1,10	5,6	4
Haití, 2021	2,75	3,45	8,0	2
Ecuador, 2016	1,89	2,28	10,7	4

Igualmente, los resultados demuestran que la actualización de la normativa sismorresistente cubana (NC 46:2017) ha mejorado significativamente la capacidad de las estructuras para resistir eventos sísmicos severos. La incorporación de requisitos de ductilidad, diseño por capacidad y mejor detallado del refuerzo transversal se traduce en una reducción notable de la fragilidad sísmica.

La utilización de aceros cubanos con menor ductilidad respecto a estándares internacionales justifica la adopción de umbrales de daño más conservadores, lo cual fue validado empíricamente con datos de terremotos en contextos similares.

Las curvas de fragilidad desarrolladas constituyen la primera herramienta probabilística adaptada a la realidad constructiva cubana, superando las limitaciones de modelos genéricos como HAZUS. El procedimiento metodológico validado representa una contribución fundamental para la evaluación técnica de la vulnerabilidad sísmica y la evidencia base para futuras revisiones normativas en Cuba.

5. CONCLUSIONES

- Se desarrolló un procedimiento analítico robusto para la construcción de curvas de fragilidad sísmica específicas para edificaciones cubanas de pórticos de hormigón armado.
- Las estructuras diseñadas bajo la NC 46:2017 presentan una fragilidad significativamente menor que aquellas diseñadas bajo la NC 46:1999, especialmente en edificios de baja altura.
- La validación empírica confirma que las curvas obtenidas reproducen con alta precisión el comportamiento observado en terremotos reales.
- Este estudio sienta las bases para la incorporación de criterios de riesgo sísmico basados en evidencia local en el diseño sismorresistente, la evaluación de la seguridad estructural y la revisión de normativas técnicas. El procedimiento desarrollado establece un referente metodológico para futuras investigaciones sobre vulnerabilidad sísmica en Cuba.

1. Federal Emergency Management Agency (1999). HAZUS®99 Earthquake Loss Estimation Methodology, User Manual. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C. United States, 314 pp. [hanos en el comportamiento sísmico de elementos de hormigón. Ciencia en su PC, \(4\), 1-15. <http://www.redalyc.org/articulo.ca?id=181322703004>](http://www.redalyc.org/articulo.ca?id=181322703004)
3. Morejón, G. (2018). Factor de reducción de las fuerzas sísmicas en edificios de pórticos de hormigón armado en Cuba. [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de la Habana]. <https://www.cenais.gob.cu/productos/publicaciones/TESIS/DOCTORADOS/TESIS%20DOCTORAL-Grisel%20Morej%C3%B3n.pdf>
4. Oficina Nacional de Normalización NC. (1999). Norma Cubana NC 46:1999: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción. La Habana, Cuba.
6. Molina, S., and Lindholm, C.D. (2007). Estimation of the confidence of earthquake damage scenarios: examples from a logic tree approach. Journal of Seismology 11(3):399–410. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10950-007-9053-3>
7. RISK-UE Consortium. (2001-2004). RISK-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European towns [Project Report]. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/EVK4-CT-2000-00014>
8. American Concrete Institute [ACI] 318-14. (2014). Building code requirements for structural concrete. Farmington Hills, USA. DOI: <https://doi.org/10.14359/51686915>
9. Computers and Structures, Inc. (2020). SAP2000 v22: Integrated finite element analysis and design of structures [Software]. <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>
10. Ghobarah, A., Aly, N. y El-Attar, M. (1997). Performance level criteria and evaluation. A critical review of proposed guidelines. Seismic design methodology for the next generation of codes, Fajfar and Krawinkler, Editors, Balkema, Slovenia. DOI: <https://doi.org/10.1080/1363246980935033>
11. Aguiar, R., & Bobadilla, D. (2005). Curvas de fragilidad para estructuras de H/A de Ecuador menores a siete pisos. Revista Ciencia, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, Vol. 8, No. 2, pp. 81-88, Quito, Ecuador. <https://core.ac.uk>