Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. ISSN 1317-6781 https://n2t.net/ark:/42414/banih/722026/179
Caracas, Nº 72. Edición especial, octubre 2026: 258 – 267

MANUAL MONOGRÁFICO DE RESILIENCIA URBANA Y BLINDAJE ESTRUCTURAL SISMORRESISTENTE
Análisis de los Colapsos en Caracas y La Guaira bajo la Normativa NCh433[1]

Marcos A. REBONATTO D.

RESUMEN

El parque edificado en Venezuela presenta vulnerabilidades sísmicas críticas, evidenciadas por colapsos históricos debidos a irregularidades de "piso blando" y fallas por ausencia de confinamiento transversal. Esta monografía propone una evolución técnica y de política pública: unificar los criterios de inspección post-sismo venezolanos (protocolos FUNVISIS / IMME-UCV) con la estricta gobernanza de diseño preventivo del modelo normativo chileno (NCh433 y NCh430). La tesis central plantea transformar el diagnóstico de vulnerabilidad en un mecanismo legal vinculante que obligue a la ejecución de proyectos de reforzamiento estructural (retrofitting), introduciendo la figura de responsabilidad solidaria del Revisor Independiente. El análisis demuestra que intervenir el parque vulnerable requiere una inversión preventiva del 15% al 25% del valor de reposición del inmueble, mitigando el riesgo soberano de pérdidas macroeconómicas catastróficas.

ABSTRACT

Monographic manual on urban resilience and seismic structural hardening: Analysis of building collapses in Caracas and La Guaira under the NCh433 Standard

The built environment in Venezuela presents critical seismic vulnerabilities, evidenced by historical collapses due to "soft story" irregularities and lack of transverse confinement. This monograph proposes a technical and public policy evolution: unifying Venezuela's post-earthquake inspection criteria (FUNVISIS / IMME-UCV protocols) with the strict preventive design governance of the Chilean normative model (NCh433 and NCh430 codes). The central thesis proposes transforming vulnerability diagnosis into a binding legal mechanism that mandates the execution of structural retrofitting projects, introducing the joint liability framework of an Independent Reviewer. The analysis demonstrates that intervening in vulnerable structures requires a preventive investment of 15% to 25% of the property's replacement value, mitigating the sovereign risk of catastrophic macroeconomic losses.

Palabras clave: Ingeniería sismorresistente; resiliencia urbana; piso blando; retrofitting; vulnerabilidad sísmica; gobernanza estructural; NCh433; FUNVISIS.
Keywords: Earthquake engineering; urban resilience; soft story; retrofitting; seismic vulnerability; structural governance; NCh433; FUNVISIS.

INTRODUCCIÓN

El parque estructural construido en Venezuela durante la segunda mitad del siglo XX presenta vulnerabilidades sísmicas críticas, evidenciadas históricamente por colapsos catastróficos como el del Hotel Macuto Sheraton durante el sismo de Caracas de 1967 (Rebonatto D., 2026(a)). Las inspecciones post-sismo, fundamentadas en los protocolos de FUNVISIS y el IMME-UCV, han diagnosticado de manera precisa patologías letales como la irregularidad de "piso blando" y la falla frágil por ausencia de confinamiento transversal en columnas. Sin embargo, el diagnóstico técnico reactivo resulta estructuralmente insuficiente para salvaguardar la vida humana y el patrimonio ante futuros eventos tectónicos.

Este ***Manual Monográfico de Resiliencia Urbana y Blindaje Estructural Sismorresistente*** plantea una evolución integral en la ingeniería nacional: la unificación de los criterios de inspección ex-post de Venezuela con la estricta gobernanza de diseño preventivo (ex-ante) establecida por el modelo normativo chileno (NCh433 y NCh430). La tesis central de este documento es transformar el diagnóstico de vulnerabilidad —como el etiquetado de habitabilidad— en un disparador legal vinculante que obligue a ejecutar proyectos de reingeniería y reforzamiento (retrofitting) bajo el principio de responsabilidad solidaria.

Para fundamentar esta transición hacia la resiliencia urbana, el manual desarrolla un hilo conductor multidisciplinario estructurado en cuatro capítulos:

[1] Unificación de Criterios de Inspección Ex-Post (FUNVISIS/IMME-UCV) y Gobernanza de Diseño Ex-Ante (Normativa Chilena NCh433/NCh430)

- **Capítulo 1:** Diagnostica la mecánica del colapso histórico por discontinuidad de rigidez vertical (piso blando) y demuestra cómo las exigencias de muros de corte continuos del modelo chileno anulan este riesgo.
- **Capítulo 2:** Profundiza en la patología de los materiales, correlacionando el daño observable en campo con la necesidad de emplear aceros de alta ductilidad (NCh203 y NCh204) para evitar fallas frágiles.
- **Capítulo 3:** Aborda la viabilidad institucional y financiera, demostrando que la adopción de la figura del Revisor Independiente y la inversión preventiva en reingeniería son imperativos macroeconómicos para evitar la pérdida de un porcentaje crítico del PIB Nacional.
- **Capítulo 4:** Presenta un portafolio técnico e ilustrado de estrategias de blindaje estructural, detallando la ejecución del encamisado de columnas, la adición de disipadores de energía y la construcción de muros de corte externos.

La ingeniería frente a la amenaza sísmica debe evolucionar de la administración del desastre a la garantía del desempeño estructural. Este manual establece la ruta técnica, legal y financiera para lograr ese objetivo.

CAPÍTULO 1

Análisis Del Colapso Por Piso Blando – Caso Histórico Hotel Macuto Sheraton (1967).

1.1. Contexto y Configuración Estructural del Inmueble

El Hotel Macuto Sheraton, ubicado en el sector Caribe de la población de Caraballeda (antiguo Estado Vargas, hoy Estado La Guaira), constituye uno de los ejemplos más documentados en la ingeniería estructural latinoamericana sobre los efectos destructivos de la irregularidad rigidez-masa en sentido vertical (Rebonatto D., 2026(a)). Diseñado y construido en el año 1955, el complejo arquitectónico principal estaba compuesto por tres módulos estructurales independientes vinculados a través de dos juntas de construcción, abarcando una planta rectangular en su base de 104 metros de longitud por 33 metros de ancho.

La torre contaba con un total de 11 pisos sobre el nivel del terreno. Sin embargo, su configuración estructural de concreto armado presentaba una discontinuidad severa de sus elementos resistentes:

- **Niveles Superiores (Pisos 5 al 9):** La estructura se encontraba rígidamente rigidizada mediante densos muros de concreto armado combinados con pórticos, diseñados para absorber las fuerzas horizontales.
- **Niveles Inferiores (Nivel Playa/Semisótano, Lobby y Mezzanina):** Los muros estructurales superiores se interrumpían de forma abrupta al llegar al piso 4, no continuando hasta las fundaciones. En consecuencia, los tres niveles más bajos dependían exclusivamente de un sistema de pórticos puros, sustentados por columnas circulares de 1.10 metros de diámetro en el nivel Mezzanina.

1.2. Mecánica de la Falla en el Piso Crítico (Mezzanina)

Durante el sismo de Caracas del 29 de julio de 1967, la abrupta transición de rigidez convirtió a los niveles inferiores en un clásico mecanismo de **"Piso Blando"** (*Soft Story*). Mientras los pisos superiores se comportaron prácticamente como un bloque rígido debido a la presencia de los muros, las fuerzas de corte sísmico se concentraron dinámicamente en los niveles inferiores desprovistos de rigidez lateral.

El **Nivel Mezzanina (Piso 3)** del Módulo Central fue identificado técnicamente como el **Piso Crítico** (Rebonatto D., 2026(a)) debido a la severidad geométrica de sus daños:

- **Distribución del Daño en Columnas:** El análisis de la planta del Módulo Central reveló que, de un total de 24 columnas examinadas en dicho nivel, 14 columnas (58%) sufrieron daño estructural calificado como Severo o Completo. Solo 4 columnas (17%) presentaron daño Moderado y 6 columnas (25%) quedaron en estado Sin Daño o Leve.
- **Mecanismo de Falla Mecánica:** Las columnas circulares experimentaron fallas violentas por esfuerzo cortante, caracterizadas por un agrietamiento diagonal severo, desprendimiento masivo del recubrimiento de concreto y el consecuente pandeo de las barras de acero de refuerzo longitudinal debido a un confinamiento transversal insuficiente.
- **Comportamiento de Vigas y Elementos No Estructurales:** Al menos el 55% de las vigas del nivel Mezzanina manifestaron agrietamientos por flexocortante. Asimismo, se registró el colapso generalizado de los cielos rasos (techos falsos) en las áreas del Lobby, la cocina y el Nivel Playa, además de fallas por cortante en las paredes de relleno y la tabiquería de los ascensores. A pesar de albergar a 1.200 personas al momento del evento, el colapso de estos componentes no estructurales provocó de forma directa 2 fallecimientos.

Diagnóstico del Riesgo Externo Asociado: La evaluación post-sísmica en los alrededores del hotel evidenció un peligro geológico-geotécnico calificado como **Medio/Moderado**, gatillado por el fenómeno de licuación del suelo costero. Este evento provocó grietas considerables en el pavimento, la piscina, el muelle y la línea de playa, además del desplazamiento permanente de estructuras livianas de techo de las adyacencias. Asimismo, el entorno se vio amenazado por el colapso total de los pisos superiores del Edificio Mansión Charaima y el asentamiento con rotación de una vivienda aledaña de tres niveles.

1.3. Tratamiento Técnico bajo el Enfoque Sísmico Chileno (*NCh433, NCh430 y DS 61*)

Si el Hotel Macuto Sheraton hubiese sido parametrizado, calculado y fiscalizado bajo las exigencias de la gobernanza de ingeniería chilena, el comportamiento de la estructura habría cambiado de forma radical, mitigando la concentración de esfuerzos en la base mediante tres principios normativos obligatorios:

a) Continuidad Absoluta de los Muros de Corte (NCh433) (Instituto Nacional de Normalización (INN), 2012)

La norma de diseño sísmico chilena **NCh433** prohíbe explícitamente o penaliza de forma drástica en el espectro de diseño las irregularidades estructurales verticales del tipo "piso blando". Bajo este estándar, los muros de concreto armado dispuestos entre los pisos 5 y 9 habrían sido obligados a **continuar verticalmente de forma ininterrumpida hasta llegar al sistema de fundaciones**. Esta densificación basal dota al edificio de una rigidez lateral uniforme, distribuyendo el esfuerzo de corte basal a lo largo de toda la altura y eliminando el punto de pivotaje crítico en el nivel Mezzanina.

b) Confinamiento Sísmico y Ductilidad del Núcleo (NCh430)

Para las columnas circulares de 1.10 metros de diámetro, la norma **NCh430** (alineada con los requisitos de alta ductilidad del código americano ACI 318) (Instituto Nacional de Normalización (INN), 2008) exige un detallado de acero de refuerzo transversal ultra-denso. Esto implica la disposición de estribos cerrados o espirales continuas con ganchos sísmicos a 135° espaciados a distancias mínimas en las zonas de confinamiento (nodos viga-columna). Este detallado garantiza que, ante altas demandas de aceleración espectral, el concreto experimente una deformación plástica controlada sin perder su capacidad portante vertical, evitando por completo el desprendimiento explosivo del recubrimiento y el pandeo del acero longitudinal.

c) Neutralización de la Licuación del Suelo (Decreto Supremo DS 61)

Dadas las evidencias de arenas saturadas y licuación documentadas por FUNVISIS en la línea costera de Caraballeda, el reglamento **DS 61** habría clasificado el terreno firmemente dentro de las categorías de suelos propensos a la amplificación de ondas sísmicas. El DS 61 exige para estos escenarios la medición obligatoria de la velocidad de la onda de corte (V_{s30}) y obliga al ingeniero calculista a penalizar las fuerzas sísmicas de diseño, forzando la construcción de **fundaciones profundas (pilotajes)** o losas de fundación continuas con vigas de amarra rígidas (Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), 2011). Esto neutraliza los asentamientos diferenciales y las rotaciones de base sufridas por las estructuras costeras del sector.

d) Control Estricto de Deformación Lateral (Drift) para Componentes No Estructurales

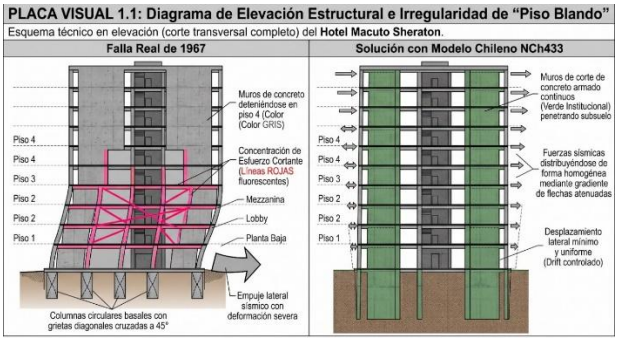
Para evitar las 2 muertes causadas por la caída de los techos falsos y el colapso de las paredes de relleno, la NCh433 impone límites severos al desplazamiento relativo entre pisos (*Drift*). Al rigidizar la estructura e impedir que el edificio se deforme lateralmente más allá de los rangos tolerables, se protege la integridad geométrica de la tabiquería, cielos rasos e instalaciones mecánicas, salvaguardando la vida humana incluso si los elementos estructurales principales sufren agrietamientos moderados.

1.4. Respaldo Visual del Desempeño Sísmico

***Placa Visual 1.1**: Diagrama de Elevación Estructural e Irregularidad de "Piso Blando*

Objetivo Ingenieril: Ilustrar la discontinuidad mecánica de rigidez lateral en elevación que provoca el mecanismo de colapso por "piso blando", y demostrar visualmente cómo el modelo normativo chileno anula este riesgo mediante muros de corte continuos.

Detalle Visual: Esta lámina ilustra, mediante un esquema técnico en elevación del Hotel Macuto Sheraton, una comparación visual entre una falla real y su solución estructural. La sección izquierda, "Falla Real de 1967", muestra cómo muros de concreto discontinuos (en gris), que se detienen bruscamente en el piso 4, provocan una deformación severa concentrada en los niveles inferiores (Mezzanine, Lobby y Planta Baja), donde las líneas rojas fluorescentes indican concentraciones de esfuerzo cortante y las columnas basales presentan grietas diagonales a 45°. La sección derecha, "Solución con Modelo Chileno NCh433", contrasta este escenario introduciendo muros de corte de concreto armado continuos (en verde institucional) que se extienden hasta el subsuelo, demostrando cómo las fuerzas sísmicas se distribuyen de forma homogénea (gradiente de flechas atenuadas) logrando un desplazamiento lateral mínimo y uniforme (drift controlado).



Fundamento Técnico:

Estado Vulnerable: En la elevación estructural de 1967 (lado izquierdo), se observa cómo los muros de corte de concreto armado se interrumpen en el piso 4, dejando la base apoyada únicamente en columnas esbeltas. Esta "falta de muros" en la planta baja concentró el 100% de la fuerza de corte sísmico en el nivel Mezzanina, superando la capacidad de las columnas basales y provocando su colapso geométrico.

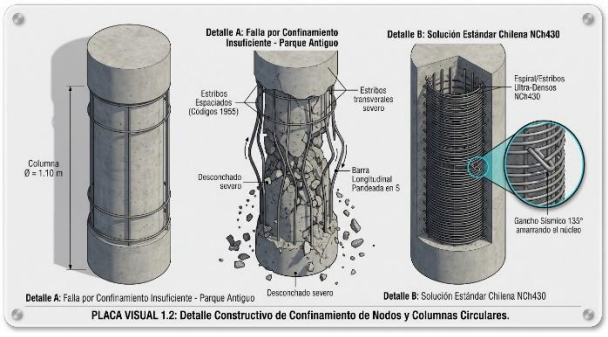
Estado Seguro (NCh433 Chilena): El modelo chileno (lado derecho) anula este riesgo al exigir continuidad obligatoria de los muros de corte desde la azotea hasta las fundaciones. Al rigidizar la base, las fuerzas sísmicas fluyen de

manera homogénea a lo largo de toda la altura de la estructura, logrando un Drift (desplazamiento lateral) controlado y evitando la deformación catastrófica del nivel basal.

***Placa Visual 1.2**: Detalle constructivo de confinamiento de nodos y columnas circulares*

Objetivo Ingenieril: El objetivo de esta lámina es exponer de manera didáctica la diferencia crítica en el comportamiento de las columnas de concreto armado bajo cargas sísmicas extremas, dependiendo exclusivamente de la disposición de su acero transversal. Busca evidenciar por qué el confinamiento denso del núcleo es un requisito indispensable para garantizar la ductilidad estructural y evitar el colapso frágil del edificio.

Detalle Visual: Esta lámina ilustra un desglose tridimensional (isométrico) de una columna de concreto circular de Ø = 1.10 m en dos escenarios contrastantes. El Detalle A expone una falla típica del parque construido con códigos antiguos (ej. 1955): se aprecian estribos muy espaciados que fallan en contener el material, provocando un desconchado severo, la caída de pedazos del núcleo triturado y el pandeo violento en forma de "S" de las barras longitudinales. Por el contrario, el Detalle B presenta la Solución Estándar Chilena NCh430, mostrando una armadura transversal conformada por espirales ultra-densas. Una lupa de acercamiento resalta específicamente el gancho sísmico doblado a 135°, el cual penetra y amarra de manera efectiva el núcleo de concreto.



PLACA VISUAL 1.2: Detalle Constructivo de Confinamiento de Nodos y Columnas Circulares.

Fundamento Técnico: El principio fundamental detrás de esta comparación es el confinamiento triaxial del hormigón. Cuando los estribos transversales están muy separados, el concreto carece de soporte lateral; al superar su límite elástico durante un sismo, el material estalla (falla frágil por aplastamiento) y el acero longitudinal, al quedar sin soporte, se pandea bajo las fuerzas de compresión. Al implementar estribos ultra-densos con ganchos sísmicos a 135° anclados hacia el interior, se genera una "jaula" resistente que ejerce presión lateral sobre el núcleo de concreto. Esto obliga al material a plastificarse de forma controlada (comportamiento dúctil), permitiendo que la columna disipe energía y mantenga su capacidad portante vertical incluso después de perder todo su recubrimiento exterior.

CAPÍTULO 2

Patología rectilínea y criterios de desempeño de los materiales sismorresistentes

Fusión de la Ficha de Campo (FUNVISIS/IMME-UCV) y la Metalurgia de Alta Ductilidad (NCh203 / NCh204)

2.1. Patología en Elementos de Concreto Armado y el Rol del Acero de Refuerzo (NCh204)

Durante la inspección del piso crítico en estructuras de pórticos de concreto (como el nivel Mezzanina del Hotel Macuto Sheraton), el inspector evalúa visualmente el ancho de las grietas y el desprendimiento del hormigón (López, y otros, 2022). No obstante, la mecánica subyacente de estas patologías depende directamente de la calidad y el detallado del acero de refuerzo interno regulado en Chile por la norma NCh204:

- **Daño Menor (Grietas < 1 mm):** Corresponde al comportamiento elástico y micro-agrietamiento controlado del concreto por flexión o retracción. El acero interno trabaja muy por debajo de su tensión de fluencia (F_y).
- **Daño Moderado (Grietas entre 1 y 2 mm con aplastamiento local):** El elemento estructural ha superado su límite elástico. El acero de refuerzo longitudinal (grados A440-280H o A630-420H) entra en su zona de fluencia, comenzando a experimentar deformaciones plásticas permanentes, pero controladas (Rebonatto D., 2026(b)), cumpliendo el objetivo chileno de disipar energía tectónica.
- **Daño Severo a Completo (Grietas > 2 mm, caída masiva de concreto, acortamiento y pandeo):** Representa la degradación total de la sección compuesta (Instituto Nacional de Normalización (INN), 2008). Ante la ausencia de un confinamiento transversal denso (estribos) exigido por la NCh430, el concreto del núcleo se tritura por compresión cíclica, eliminando el soporte lateral de las barras longitudinales. Esto gatilla el pandeo violento del acero de refuerzo, provocando la pérdida instantánea de la capacidad portante vertical de la columna y conduciendo al colapso progresivo tipo "panqueque".

2.2. Patología en Estructuras de Acero y Requisitos de Calidad Estructural (NCh203)

(López, y otros, 2022), La evaluación de campo en pórticos de acero estructural (según las tipologías de fallas históricas de Northridge 1994 y Kobe 1995 indexadas por FUNVISIS) demuestra que el acero no es inmune a fallas catastróficas si carece de la resiliencia y tenacidad adecuadas. El comportamiento ante sismos severos se divide bajo los estándares de la norma NCh203 (Aceros para uso estructural):

a) El Mecanismo de Pandeo Local y Cedencia del Alma

Falla Observada: En vigas y columnas sometidas a flexión severa, las alas experimentan arrugamientos y deformaciones perceptibles a simple vista (Daño Moderado a Severo).

Fundamento Técnico: Para mitigar esto, el acero debe poseer un equilibrio milimétrico en su composición química. Los aceros de bajo carbono (acero dulce con menos de 0.30% de Carbono) garantizan una alta ductilidad y tenacidad, permitiendo que las secciones doblen y disipen energía tectónica en forma de calor sin fracturarse de forma súbita (Rebonatto D., 2026(b)).

b) Fractura en Conexiones Soldadas y Pernadas

Falla Observada: Rotura abrupta en las soldaduras que unen el ala de la viga a la columna, desgarramiento de planchas base o ruptura de pernos de anclaje de alta tensión (Daño Completo).

Fundamento Técnico: La norma chilena NCh203 regula estrictamente los grados estructurales (como el A37-24ES) exigiendo una excelente soldabilidad. Si el acero posee un exceso de carbono (> 0.60%), el material se vuelve extremadamente duro pero frágil, lo que concentra tensiones residuales durante el proceso de soldadura y provoca fallas frágiles (ruptura súbita) ante cargas sísmicas dinámicas, anulando la reserva de resistencia de la edificación (Instituto Nacional de Normalización (INN), 2006).

2.3. Matriz de Correspondencia Mecánica, Metalúrgica y de Reingeniería

Componente e Inspección de Campo (FUNVISIS)	Calificación del Riesgo	Propiedad Mecánica Comprometida (Estudios de Acero)	Norma Chilena Aplicable	Solución Técnica de Reingeniería (Modelo Chileno)
Columnas de Concreto: Grietas diagonales a 45° con desconchado severo.	C. Alto	Pérdida de confinamiento y superación del esfuerzo último de tracción (F_u).	NCh430/NCh204	**Encamisado de columnas de hormigón:** Confinamiento mediante nueva armadura densa de acero de alta resistencia.
Estructuras de Acero: Pandeo local en vigas o fractura en uniones soldadas.	C. Alto	Agotamiento por fatiga de bajo ciclaje; superación del límite de fluencia F_y).	NCh203	**Adición de contravientos y disipadores:** Marcos externos con amortiguadores para absorber hasta el 40% de la energía.
Muros de Concreto: Grietas de ancho entre 2 y 6 mm con aplastamiento.	B. Medio	Desplazamiento residual; inicio de plastificación del refuerzo horizontal.	NCh433	**Densificación periférica:** Construcción de muros de corte externos adosados para detener la falla "panqueque".
Apoyo de Columnas: Deformación o desgarramiento de la placa base.	C. Alto	Concentración de esfuerzos de corte basal y tracción pura en pernos de anclaje.	NCh203/DS 61	**Inyección epóxica y pilotaje profundo:** Refuerzo estructural de fundaciones para amarrar rígidamente la base al suelo estable.

2.4. Análisis Visual de Patologías Estructurales

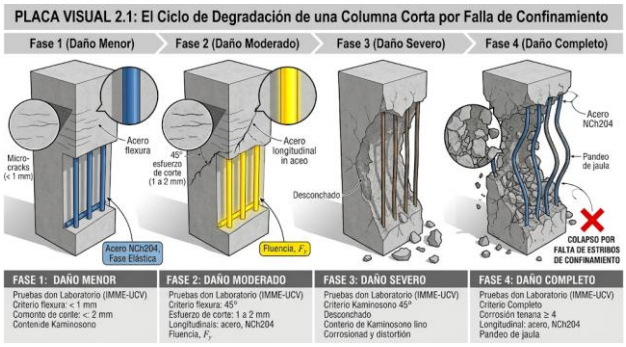
***Placa Visual 2.1**: El Ciclo de Degradación de una Columna Corta por Falla de Confinamiento*

Objetivo Ingenieril: El objetivo ingenieril de esta lámina es trazar la secuencia progresiva de degradación estructural en una columna de concreto armado que carece del confinamiento transversal adecuado. Busca evidenciar visualmente cómo la interacción entre los esfuerzos de corte y la transición del acero a su etapa de fluencia desencadena un colapso frágil, catastrófico e irreversible si no existen estribos que contengan el núcleo.

Detalle Visual: Esta lámina ilustra un diagrama secuencial de cuatro fases del ciclo de degradación de una columna corta, referenciando pruebas de laboratorio (IMME-UCV) (López, y otros, 2022), y los criterios de Kaminosono.

- En la **Fase 1 (Daño Menor)**, se aprecian micro-grietas de flexión ($< 1\,mm$) en la superficie, mientras el diagrama interno muestra el acero longitudinal (NCh204) en azul, indicando un estado estable dentro de su fase elástica.

- En la **Fase 2 (Daño Moderado)**, se desarrolla la primera grieta diagonal por esfuerzo de corte a 45° (de 1 a 2 mm), y el acero interno cambia a color amarillo para representar que ha alcanzado su punto de fluencia (F_y).
- La **Fase 3 (Daño Severo)** exhibe el desconchado superficial: el recubrimiento de concreto se fractura y cae, dejando las barras de acero expuestas.
- Finalmente, en la **Fase 4 (Daño Completo)**, se muestra el colapso definitivo: el concreto del núcleo se desintegra por completo y las barras longitudinales se doblan violentamente hacia afuera en lo que se denomina un "pandeo de jaula", ilustrando de forma gráfica la falla por ausencia de estribos de confinamiento.

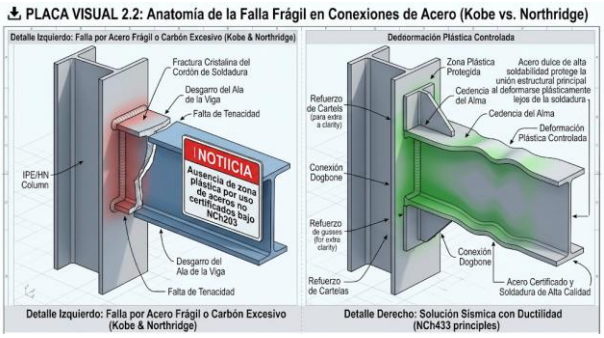


Fundamento Técnico: El fundamento técnico radica en la mecánica de la falla por compresión y cortante en elementos frágiles. Durante un evento sísmico, la columna absorbe energía deformándose. Inicialmente (Fase elástica), las grietas son controlables. Sin embargo, al aumentar la demanda lateral y entrar el acero en fluencia, el recubrimiento exterior de concreto estalla y se desprende (desconchado) debido a las deformaciones incompatibles. En este punto crítico, toda la carga axial y de corte recae sobre el núcleo y las barras longitudinales. Si la columna carece de una densa red de estribos transversales, no hay ninguna fuerza física que restrinja el movimiento lateral de las barras principales; estas sufren pandeo bajo compresión de forma instantánea, el concreto triturado del núcleo se derrama y el elemento pierde el 100% de su capacidad portante vertical, resultando en el colapso del nivel.

***Placa Visual 2.2**: Anatomía de la Falla Frágil en Conexiones de Acero (Kobe vs. Northridge)*

Objetivo Ingenieril: El objetivo ingenieril de esta lámina es contrastar el comportamiento catastrófico de las uniones de acero rígidas fabricadas con materiales inadecuados frente a las soluciones sismorresistentes modernas. Busca demostrar cómo el diseño por capacidad y la selección correcta del acero permiten crear "fusibles estructurales" que protegen las conexiones principales (los nodos) disipando la energía a través de la deformación controlada.

Detalle Visual: Esta lámina ilustra una vista ampliada en tres dimensiones de una unión de pórtico resistente a momento, donde una viga se conecta al ala de una columna. El **Detalle Izquierdo** muestra el resultado de utilizar acero frágil (con exceso de carbono): se observa una fractura cristalina abrupta que desgarra el cordón de soldadura y el ala de la viga, un tipo de falla destructiva característica de los sismos de Kobe y Northridge. Un letrero advierte sobre la "Ausencia de zona plástica por uso de aceros no certificados bajo NCh203". Por otro lado, el **Detalle Derecho** expone una solución estructural dúctil utilizando una conexión de "Ala Reducida" (Dogbone) y cartelas de refuerzo. Mediante un gradiente verde, se representa visualmente cómo la sección reducida obliga a la viga a ceder y deformarse plásticamente de manera controlada, alejando las tensiones críticas del cordón de soldadura.



Fundamento Técnico: El principio detrás de este diseño es la filosofía de "Columna Fuerte - Viga Débil" combinada con la metalurgia sismorresistente. Los aceros no certificados o con alto nivel de carbono pierden su tenacidad al ser sometidos a las altas temperaturas de la soldadura, volviéndose quebradizos y propensos a fracturarse repentinamente sin previo aviso bajo fuerzas cíclicas (falla frágil). La solución técnica consiste en emplear aceros dulces de alta soldabilidad (NCh203) y debilitar intencionalmente una pequeña sección de la viga (Dogbone) a cierta distancia del nodo. Esto crea un punto de fluencia planificado; durante un terremoto intenso, la viga se doblará y absorberá la energía sísmica en ese punto exacto, protegiendo la integridad de la soldadura y garantizando la estabilidad global de la columna estructural.

CAPÍTULO 3

Gobernanza institucional, fiscalización y la matriz de impacto económico

3.1. Del Conocimiento Técnico a la Implementación Legal

Los capítulos previos han establecido el cómo el diseño sismorresistente chileno (muros de corte continuos, detallado dúctil del acero NCh204) neutraliza mecánicamente los modos de falla catastróficos observados en Venezuela (piso blando, colapso panqueque). No obstante, el conocimiento técnico es fútil sin un marco institucional y económico que garantice su aplicación. Este capítulo aborda la reingeniería de la gobernanza, moviendo el enfoque de la respuesta al desastre hacia la mitigación obligatoria del riesgo soberano.

3.2. Gobernanza Institucional y Fiscalización: El Seguro "Ex-Ante"

a) El Modelo Chileno de Responsabilidad Solidaria (LGUC y Revisor Independiente)

El pilar de la fiscalización chilena no descansa en permisos municipales burocráticos, sino en la figura legal del Revisor Independiente de Cálculo Estructural, mandado por la Ley General de Urbanismo y Construcciones (LGUC). Esta figura, un ingeniero externo con amplia experiencia y certificado por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo, realiza una segunda auditoría completa de los planos y la memoria de cálculo antes de que se emita el permiso de construcción (Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU), 2011).

El impacto de esta figura es profundo: elimina el punto único de falla (el error de un solo ingeniero) y establece una responsabilidad solidaria (responsabilidad estricta por 10 años) entre el ingeniero calculista original, el constructor, y el revisor independiente. Este "seguro ex-ante" incentiva un cumplimiento riguroso de las normas sismorresistentes (NCh433/NCh430) para evitar litigios catastróficos.

b) Contraste con el Modelo Venezolano Actual y Propuesta de Integración

El modelo venezolano actual, ejemplificado en el manual de inspecciones de FUNVISIS, posee un enfoque predominantemente Ex-Post (reactivo) (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), 2001) (López, y otros, 2022). El protocolo de etiquetado (Rojo, Amarillo, Verde) es una herramienta vital después del sismo para clasificar la seguridad de las estructuras dañadas (López, y otros, 2022).

La propuesta monográfica central es integrar ambos enfoques. La inspección de FUNVISIS no debe ser el final del proceso, sino el disparador legal. Una etiqueta Roja o Amarilla debe activar una auditoría estructural obligatoria ejecutada bajo la figura de un Revisor Independiente (adaptado de la LGUC). Este revisor certificaría que el proyecto de reingeniería obligatoria (Reforzamiento/Retrofitting) cumple con los estándares de desempeño modernos para anular la vulnerabilidad residual, transformando la inspección reactiva en una mitigación preventiva.

3.3. Matriz de Impacto Económico: El Costo de la Inacción vs. la Inversión Preventiva

a) El Costo Macroeconómico del Desastre (El Riesgo Soberano del 2% PIB)

La inacción legislativa y la ausencia de fiscalización preventiva colocan al país en un estado de riesgo soberano latente. El costo de un colapso total (inacción) es devastador macroeconómicamente. Se estima que las pérdidas económicas directas e indirectas de un sismo mayor en zonas urbanas críticas (como La Guaira/Caracas) pueden comprometer hasta el 2% del PIB nacional. Este costo incluye no solo la reconstrucción total de activos, sino la pérdida de actividad económica, costos sociales de emergencia, indemnizaciones, y el impacto sobre infraestructura esencial (como puertos).

b) El Análisis de Costo-Beneficio del Reforzamiento (Retrofitting)

El argumento financiero a favor de la intervención preventiva es incontestable. Intervenir el parque antiguo mediante técnicas de reingeniería (como el encamisado de columnas o la adición de disipadores) cuesta solo del 15% al 25% del valor de un colapso total (valor de reposición de 100%).

El reforzamiento preventivo no es un costo hundido; es una inversión que protege el 100% del valor del activo y neutraliza el riesgo de pérdidas macroeconómicas catastróficas. Este análisis demuestra que la inacción es diez veces más costosa que la prevención.

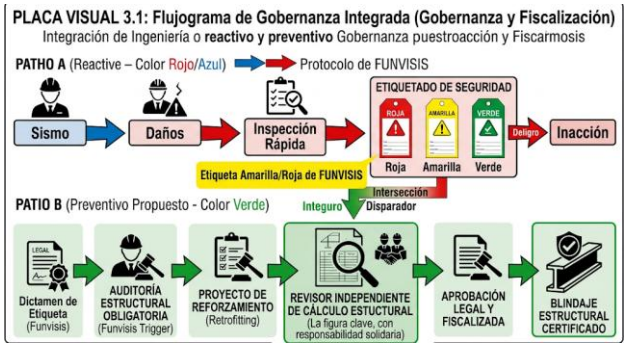
3.4. Respaldo Visual de Gobernanza y Economía

Placa Visual 3.1: *Flujograma de Gobernanza Integrada (Gobernanza y Fiscalización)*

Objetivo Ingenieril: El objetivo de esta lámina es proponer una evolución en la gobernanza estructural, integrando el protocolo reactivo tradicional de evaluación de daños post-sismo (ex-post) con un sistema de fiscalización preventiva y vinculante (ex-ante). Busca demostrar cómo transformar un simple diagnóstico de vulnerabilidad (etiquetas de daño) en un mecanismo legal automático que obligue a la reingeniería y reforzamiento de las edificaciones, erradicando el riesgo de abandono o inacción.

Detalle Visual: Esta lámina ilustra un flujograma de gobernanza estructurado en dos vías principales que se intersectan.

- En la parte superior, la **Ruta A (Reactiva - Color Rojo/Azul)** muestra el protocolo actual de FUNVISIS: ocurre un sismo, genera daños, se realiza una inspección rápida y se otorgan etiquetas de seguridad (Roja, Amarilla, Verde). Una flecha roja resalta el peligro actual: las etiquetas Roja y Amarilla suelen derivar en "Inacción".
- El punto central de la infografía establece la Etiqueta Amarilla/Roja como un **"Disparador" (Trigger**) vinculante que conecta con la vía inferior.
- En la parte inferior, la **Ruta B (Preventiva Propuesta - Color Verde)** detalla el nuevo flujo de seguridad: el dictamen de la etiqueta activa una "Auditoría Estructural Obligatoria", la cual deriva en un "Proyecto de Reforzamiento (Retrofitting)". Este proyecto debe pasar por la figura clave del **"Revisor Independiente de Cálculo Estructural"** (quien asume responsabilidad solidaria), para finalmente obtener una aprobación legal fiscalizada que culmina en un "Blindaje Estructural Certificado".

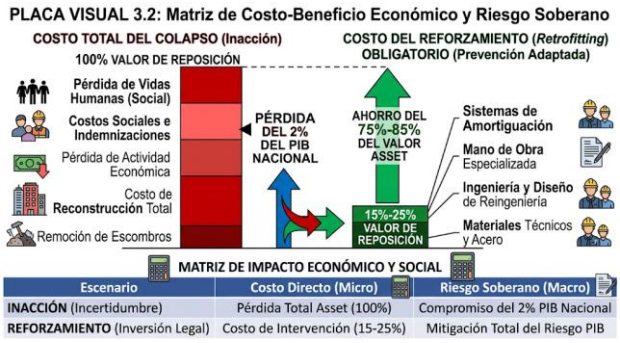


Fundamento Técnico: El fundamento técnico radica en la política pública de mitigación de riesgo y seguridad civil. Las inspecciones post-sismo (basadas en metodologías como ATC-20) son herramientas de triaje excelentes para clasificar la habitabilidad inmediata de un edificio, pero carecen de fuerza correctiva. Un edificio con etiqueta Amarilla o Roja tiene su capacidad sismorresistente severamente comprometida y es vulnerable a réplicas. Al articular este diagnóstico técnico con una normativa de fiscalización rigurosa (inspirada en la figura del Revisor Independiente de la normativa chilena), se garantiza que la anomalía estructural sea corregida mediante procedimientos de ingeniería de detalle antes de que el edificio vuelva a ser ocupado, protegiendo así la vida humana de forma activa y no solo declarativa**.**

Placa Visual 3.2*: Matriz de Costo-Beneficio Económico y Riesgo Soberano*

Objetivo Ingenieril: El objetivo ingenieril y financiero de esta lámina es fundamentar económicamente la necesidad de intervenir el parque estructural vulnerable. Busca demostrar de manera cuantitativa que el reforzamiento sísmico preventivo (retrofitting) es una estrategia macroeconómicamente superior frente a asumir los costos catastróficos asociados al colapso, transformando la ingeniería preventiva en una inversión de alto rendimiento para la mitigación del riesgo soberano.

Detalle Visual: Esta lámina ilustra un gráfico comparativo y una matriz de impacto financiero. En el lado izquierdo (Color Rojo), el "Costo Total del Colapso (Inacción)" se representa con una barra que abarca el 100% del valor de reposición. Esta barra desglosa factores de pérdida catastrófica: remoción de escombros, reconstrucción, pérdida de actividad económica, costos sociales y pérdida de vidas humanas, apuntando a una afectación macroeconómica del 2% del PIB Nacional. En el lado derecho (Color Verde), el "Costo del Reforzamiento (Retrofitting)" se muestra con una barra significativamente menor (15%-25% del valor de reposición), detallando la inversión en materiales, ingeniería, mano de obra y sistemas de amortiguación. Una gran flecha verde indica un ahorro del 75%-85% del valor del activo. En la base, la "Matriz de Impacto Económico y Social" resume de forma estructurada ambos escenarios, contrastando la pérdida total y el compromiso del PIB frente a la mitigación total del riesgo mediante la inversión preventiva.



Fundamento Técnico: El fundamento técnico se apoya en la economía de la mitigación de desastres. Desde la perspectiva de la ingeniería de ciclo de vida y la resiliencia estructural, permitir que una edificación alcance su estado límite de colapso implica no solo la pérdida total del activo físico (costo directo), sino que detona externalidades negativas masivas (lucro cesante, crisis habitacional y pérdida de vidas). La técnica del retrofitting aplica el principio de intervención localizada: al invertir una fracción controlada del capital (15% a 25%) en rigidizar y dotar de ductilidad a la estructura existente, se garantiza su desempeño bajo demanda sísmica severa. Esto neutraliza la incertidumbre asociada a la inacción y blinda la infraestructura, protegiendo tanto el patrimonio microeconómico como la estabilidad macroeconómica del país.

CAPÍTULO 4

Ingeniería de reforzamiento estructural (retrofitting): estrategias chilenas aplicadas al parque venezolano

4.1. Introducción al Blindaje de Estructuras Vulnerables

El diagnóstico realizado en el Capítulo 1 sobre el colapso del Macuto Sheraton demostró que el talón de Aquiles de la edificación antigua venezolana reside en la irregularidad de Piso Blando y la ausencia de confinamiento sísmico en las uniones viga-columna (nodos). El Capítulo 3 validó económicamente que intervenir este parque es diez veces más rentable que asumir el costo del desastre.

En este capítulo, desglosaremos la ingeniería de implementación. El objetivo del ***Retrofitting*** (Reforzamiento) bajo el estándar chileno no es simplemente "arreglar grietas", sino **blindar la estructura** para neutralizar mecánicamente los modos de falla catastróficos, garantizando que el edificio pueda deformarse de manera plástica sin colapsar (ductilidad).

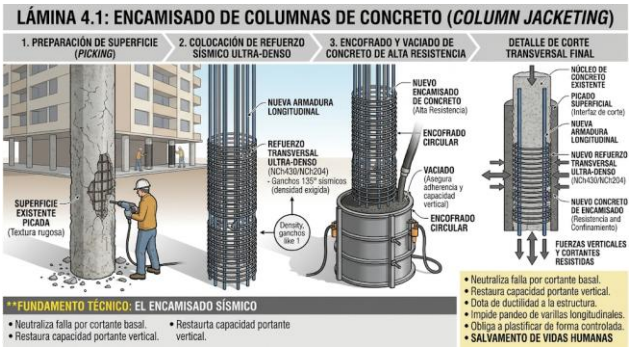
4.2. Catálogo Visual de Estrategias Técnicas de Implementación

Para cumplir con el requerimiento de un compendio densamente ilustrado, hemos confeccionado un portafolio de ingeniería que desglosa visualmente las tres técnicas clave de reforzamiento, detallando la correcta aplicación de la tecnología de los materiales (Acero NCh204).

***Placa Visual 4.1**: Encamisado de columnas de concreto (column jacketing)*

Objetivo de Ingeniería: Neutralizar la falla por cortante y aplastamiento en las columnas basales vulnerables (el nodo del piso blando). Esta técnica restituye la capacidad portante vertical y dota de ductilidad a la base del edificio.

Detalle Visual: La Lámina 4.1 muestra el proceso secuencial en una columna circular existente. Se debe picar la superficie antigua para garantizar la adherencia, colocar una armadura de confinamiento transversal ultra-densa (espirales o estribos cerrados con ganchos a 135°, exigidos por NCh430 y NCh204, y vaciar concreto de alta resistencia.

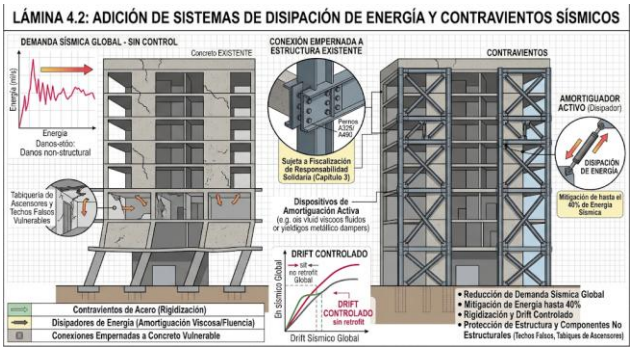


Fundamento Técnico: El "encamisado" confina el núcleo de concreto existente, impidiendo el pandeo de las barras longitudinales y obligando al material a plastificarse (Rebonatto D., 2026(b)) de forma controlada sin perder su capacidad de carga vertical, salvando la vida humana.

***Placa Visual 4.2**: Adición de sistemas de disipación de energía y contravientos sísmicos*

Objetivo de Ingeniería: Reducir drásticamente la demanda sísmica global que impacta a la estructura existente, absorbiendo y disipando la energía antes de que dañe los elementos de concreto vulnerable.

Detalle Visual: La Lámina 4.2 ilustra la instalación de marcos de acero (Rebonatto D., 2026(b)) en diagonal equipados con dispositivos de amortiguación activa en las fachadas. Las conexiones a las vigas y columnas de concreto existentes deben ser empernadas (Rebonatto D., 2026(b)) y estar sujetas a la fiscalización de responsabilidad solidaria del Capítulo 3.

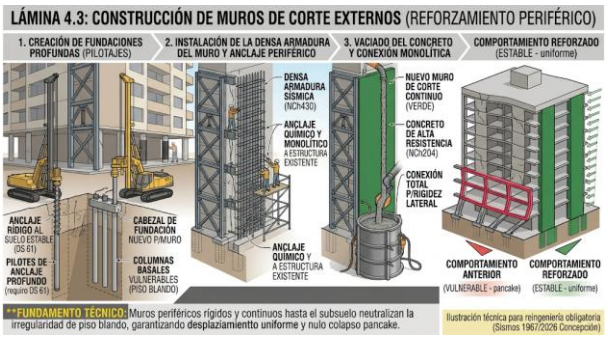


Fundamento Técnico: Al rigidizar la estructura e incorporar disipadores, se reduce el desplazamiento lateral (*Drift* controlled), mitigando hasta el 40% de la energía del sismo. Esto protege no solo la estructura, sino también los componentes no estructurales, como los techos falsos y la tabiquería de ascensores que fallaron en el Sheraton.

***Placa Visual 4.3**: Construcción de muros de corte externos (reforzamiento periférico)*

Objetivo de Ingeniería: Proveer rigidez lateral y redundancia estructural a edificios de pórticos vulnerables, dotándolos del "Modelo de Muros de Corte Continuos" chileno.

Detalle Visual: La Lámina 4.3 detalla la construcción secuencial: primero, la creación obligatoria de fundaciones profundas (pilotajes) para asegurar el anclaje rígido al suelo estable (exigencia del DS 61), seguida de la instalación de la densa armadura de muro y el vaciado del concreto.



Fundamento Técnico: Al adherir muros periféricos rígidos que continúan sin interrupciones hasta el subsuelo, se neutraliza la irregularidad de piso blando, garantizando que el edificio se desplace de manera uniforme y estable, anulando el colapso panqueque.

***Placa Visual 4.4**: Efecto global de la reingeniería: del piso blando al blindaje estructural*

Objetivo de Ingeniería: Demostrar visualmente cómo la implementación integrada de estas técnicas transforma radicalmente el comportamiento dinámico del edificio.

Detalle Visual: La Lámina 4.4 presenta una comparativa final del mismo edificio. A la izquierda (Estado Inicial), se observa la concentración de esfuerzo cortante en la base (zona roja). A la derecha (Estado Intervenido), se muestra una estructura rígida y continua, donde las fuerzas sísmicas fluyen de forma homogénea (flechas verdes).



Fundamento Técnico: Esta transformación es el **Blindaje Estructural**. Al rigidizar la base, confinar las columnas y disipar la energía, se garantiza una deformación controlada en el rango plástico, salvaguardando la vida humana y protegiendo el 100% del valor del activo macroeconómico.

CONCLUSIONES GENERALES

La vulnerabilidad sísmica del parque edificado no es una fatalidad ineludible de la naturaleza, sino el resultado directo de configuraciones estructurales discontinuas y carencias normativas en el detallado de los materiales. El análisis exhaustivo del colapso histórico del Hotel Macuto Sheraton y la patología de los elementos de concreto armado demuestran que las metodologías reactivas de evaluación post-sismo, aunque vitales para el triaje de emergencias, son insuficientes para garantizar la seguridad civil a largo plazo.

Para transformar esta realidad, este manual establece que la mitigación del riesgo debe fundamentarse en tres pilares innegociables de resiliencia urbana:

- **Ingeniería de Ductilidad y Continuidad:** La adopción de los principios de diseño de la normativa chilena (NCh433 y NCh430) exige la eliminación de irregularidades verticales como el piso blando mediante muros de corte continuos hasta la fundación, y la implementación de confinamiento triaxial ultra-denso (ganchos sísmicos a 135°) para evitar el colapso frágil y garantizar la disipación de energía.
- **Gobernanza Preventiva y Responsabilidad Solidaria**: Es imperativo sustituir la inacción legal derivada de las etiquetas de daño por un sistema de fiscalización vinculante. La incorporación de la figura del Revisor Independiente de Cálculo Estructural convierte el diagnóstico de vulnerabilidad en una obligación ineludible de reingeniería (retrofitting), erradicando el riesgo de abandono institucional.
- **Rentabilidad Macroeconómica de la Prevención:** El reforzamiento estructural constituye una inversión estratégica de alto rendimiento. Asumir un costo de intervención preventivo equivalente al 15%-25% del valor de reposición del inmueble blinda el 100% del activo físico y protege al país de un compromiso catastrófico estimado en un 2% del PIB nacional frente a un evento sísmico severo.

En definitiva, el blindaje estructural sismorresistente trasciende el cálculo matemático; es una política integral de Estado. Al unificar el diagnóstico clínico de la ingeniería venezolana con el rigor preventivo y legal de la ingeniería chilena, se traza una ruta definitiva para dejar de administrar el desastre y comenzar a garantizar la resiliencia de las ciudades y la preservación de la vida humana.

Referencias

Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). (2001). *Manual para la Inspección y Evaluación Post-Sísmica de Edificaciones*. Caracas, Venezuela.

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2006). *NCh203 y NCh204: Aceros para uso estructural y Hormigón Armado*. Santiago, Chile.

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2008). *NCh430.Of2008 Hormigón armado - Requisitos de diseño y cálculo*. Santiago, Chile.

Instituto Nacional de Normalización (INN). (2012). *NCh433.Of1996 Diseño sísmico de edificios (Modificada en 2012)*. Santiago, Chile.

López, O., Coronel D., G., Fierro, F., Marinilli, A., Ginés, C., & Urich, A. (2022). *Evaluación Rápida de Daños en Edificaciones: Manual de Entrenamiento. Versión 02-05-2022*. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) e Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME-UCV), Caracas, Venezuela.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2011). *Decreto 61: Reglamenta diseño sísmico de edificios*. Santiago, Chile.

Rebonatto D., M. (2026(a)). *Terremotos en Venezuela y el Modelo Chileno: Análisis de los Colapsos en Caracas y La Guaira bajo la Normativa NCh433*. Zenodo / INGMARD - Consultoría Técnica Sismorresistente, Concepción, Chile.

Rebonatto D., M. (2026(b)). *El Acero en la Industria Chilena: Proceso Productivo, Propiedades Mecánicas, Requisitos Sísmicos y Análisis de Mercado*. INGMARD - Consultoría Técnica Sismorresistente, Concepción, Chile.