

Metodología de evaluación y rehabilitación sísmica para viviendas informales en la ciudad de Quito

Seismic evaluation and rehabilitation methodology of informal housing in the city of Quito

Paúl Edmundo Guerrero Dumancela¹ (paul.guerrero@doctorado.unini.edu.mx)
(<https://orcid.org/0000-0002-8510-0267>)

María de las Nieves Suárez Sánchez² (maria.suarez@unini.edu.mx) (<https://orcid.org/0009-0004-0548-8460>)

Resumen

Enfoque sistémico, evaluación estructural, rehabilitación sísmica, viviendas informales En la ciudad de Quito, cerca del 60% de los edificios se han construido de manera informal (aproximadamente 519.462 construcciones habitadas por 1'607.833 personas). Estas viviendas se han construido sin criterios de diseño sísmico, con materiales deficientes, configuración estructural inadecuada y técnicas constructivas deficientes. La vulnerabilidad de estas estructuras provocaría grandes pérdidas de vidas y recursos económicos en caso de terremotos severos. Esta publicación busca contribuir con una propuesta metodológica de evaluación y rehabilitación sísmica para disminuir la vulnerabilidad, mitigar el riesgo sísmico y satisfacer la demanda de viviendas de calidad, adecuadas y seguras (viviendas CAS). La propuesta considera como punto de partida los métodos de evaluación y rehabilitación sísmica propuestos en normas de Estados Unidos (FEMA P-154, FEMA 178, FEMA 306, FEMA 356, FEMA 440, ASCE41-17, etc.) para edificios formales (estandarizados) y se adapta con base en la norma local vigente (NEC-15) e información primaria obtenida mediante encuestas a 382 propietarios y 2469 inspecciones a viviendas construidas de manera informal en el sector Sur de Quito. En conclusión, esta propuesta metodológica llena un vacío en la normativa local y es un aporte para la ciudad de Quito y contribuye con la mejora del desempeño sísmico de las edificaciones informales.

Abstract

Systemic approach, structural evaluation, seismic rehabilitation, informal housing. In Quito city, around 60% of buildings have been built informally (approximately 473,000 buildings inhabited by 1,892,000 people). These buildings were built without seismic design criteria, with poor materials, inadequate structural configuration, and deficient construction techniques. The vulnerability of these structures would cause big losses of lives and economic resources in case of severe earthquakes. This paper seeks to contribute with a methodological proposal for seismic

¹ Universidad Internacional Iberoamericana - UNINI, Campeche, Mexico. Doctorado en proyectos. México

² Universidad Internacional Iberoamericana - UNINI, Campeche, Mexico. Doctorado en proyectos. México

evaluation and rehabilitation of informal housing in the city to reduce the vulnerability, mitigate seismic risk, and satisfy the demand for quality, adequate, and safe housing (QAS housing). The proposal considers as a starting point the seismic evaluation and rehabilitation methods proposed in US standards (FEMA P-154, FEMA 178, FEMA 306, FEMA 356, FEMA 440, ASCE41-17, etc.) for formal buildings (standard buildings). It is adapted based on the local standard (NEC-15) and primary information obtained from 382 owners and 2,469 informal housing evaluations. In conclusion, this proposal is a contribution to the city improving the seismic performance of informal housing.

Palabras clave: Enfoque sistémico, evaluación estructural, rehabilitación sísmica, viviendas informales

Keywords: Systemic approach, structural evaluation, seismic rehabilitation, informal housing.

Introducción

Esta publicación busca contribuir con una propuesta metodológica para la evaluación y rehabilitación sísmica de viviendas informales en la ciudad de Quito. La metodología que se aplica para evaluar y rehabilitar estas viviendas busca mitigar el riesgo sísmico y satisfacer la demanda de viviendas de calidad que sean adecuadas y seguras (Viviendas CAS) que cumplan con la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15) (MIDUVI, 2015a). El termino rehabilitación se interpreta como la suma de todas las acciones destinadas a restituir las prestaciones de un edificio, más todas las acciones necesarias para el reacondicionamiento o reforzamiento de otras prestaciones. Reforzar se refiere a dotar de nuevas prestaciones a una estructura sin necesidad de que haya experimentado daño y las hubiese perdido (Guerrero, Mota-Páez, Escolano, 2024).

La ciudad de Quito es la más poblada de Ecuador con más de 2'679.722 habitantes y 865.770 viviendas (INEC, 2024), está ubicada en una zona de alta peligrosidad sísmica (MIDUVI, 2015a), al menos el 60% de las viviendas se han construido de manera informal (INEC, 2019), 519.462 construcciones, por lo que son vulnerables, pueden sufrir daños severos en un evento sísmico poniendo en riesgo la salud y la vida de sus habitantes, y provocando pérdidas económicas que afectan a la sociedad. Se estima que existe una demanda de viviendas CAS de al menos 1'607.833 personas. La municipalidad es la responsable de ejercer control sobre el uso y la ocupación de suelo, pero debido a la desatención, al limitado presupuesto y al gran tamaño del problema técnico, no ha podido ejecutar proyectos para mejorar el desempeño sísmico de estas viviendas.

Las viviendas informales son edificios construidos sin el permiso de la municipalidad, por lo general sin el diseño de un profesional responsable, con materiales, configuración y técnicas constructivas deficientes. Por lo que para satisfacer la demanda de una vivienda CAS, como la que

por derecho y dignidad un ser humano debe tener, se necesita mitigar el riesgo sísmico, para ello las viviendas se deben evaluar y rehabilitar.

Método

La metodología que se utiliza para desarrollar la investigación es cualitativa, se considera como punto de partida los métodos de evaluación y rehabilitación sísmica propuestos en normas de Estados Unidos para edificios formales (estandarizados) y se complementa con información primaria obtenida en la ciudad de Quito de 382 encuestas a propietarios y 2469 inspecciones a viviendas construidas de manera informal en el Sur de la ciudad. Con base en las inspecciones y encuestas, se caracteriza los sistemas estructurales, su configuración en planta y en elevación, y mediante un enfoque sistémico se establece una propuesta metodológica adaptada la normativa local (NEC-15) para la evaluación, rehabilitación sísmica y monitoreo estructural de las viviendas informales.

Al menos el 80% de los edificios informales para viviendas en la ciudad son de hormigón armado de uno a tres pisos, se construyen típicamente con losas bidireccionales, su sistema estructural principal son los pórticos resistentes a momento (con vigas descolgadas o losas planas) con mampostería no reforzada de relleno. La configuración geométrica para viviendas informales es variable, se utilizan cubiertas inclinadas, planas, diferentes alturas de entrepisos y con irregularidades en planta y elevación. Sin embargo, un gran número de viviendas se construyen con una geometría regular en planta y elevación, con ejes ortogonales de tres y cuatro vanos en cada dirección con luces desde tres metros hasta los seis metros y la altura de los entrepisos varia de 2.40 a 3.00 metros.

El procedimiento de evaluación propuesto incluye dos niveles: nivel de diagnóstico preliminar basado en evaluaciones visuales rápidas de acuerdo con FEMA P-154 (FEMA, 2015) y el Manual de procedimiento administrativo y técnico para la evaluación de las edificaciones (MIDUVI, 2022); y el nivel de evaluación detallada mediante la realización de modelos matemáticos lineales y/o no lineales para determinar el desempeño estructural con base en las normas FEMA-356 (FEMA, 2000), ASCE 41(ASCE, 2017), límites de deriva (Ghobarah, 2004), Hazus Earthquake Model (FEMA, 2022) y NEC-15 (MIDUVI, 2015b). Para la rehabilitación sísmica y monitoreo se consideran los procedimientos recomendados por FEMA-306 (FEMA, 1998), NEC-15 (MIDUVI, 2015a) y las soluciones de rehabilitación convencionales y no convencionales se validan determinando el desempeño sísmico de las viviendas rehabilitadas mediante modelos matemáticos estáticos y dinámicos no lineales.

Resultados

La metodología propuesta para evaluar, rehabilitar y monitorear viviendas informales en Quito contempla tres etapas (Figura 1):

Etapa 1 – Recopilación de información y evaluación estructural.

Etapa 2 – Diseño de la solución para la rehabilitación estructural.

Etapa 3 – Plan de monitoreo estructural y reporte ejecutivo.

Etapa 1 – Recopilación de información y evaluación estructural

Recopilación de información

Esta etapa comprende la recopilación de información secundaria a través de estudios previos e información primaria mediante inspecciones y ensayos. La información secundaria incluye: Informes de regulación metropolitana, licencias metropolitanas urbanísticas, estudios previos, planos, esquemas constructivos, memorias de cálculo, informes, presupuestos, publicaciones y cualquier otra información que permita realizar un análisis histórico - arquitectónico/estructural - urbano del sector y de las edificaciones para determinar sus características y el contexto en el cual se construyeron. Se contrasta y se complementa la información secundaria recopilada con información primaria que se obtiene mediante inspecciones visuales para:

Identificar el sistema estructural resistente.

Identificar el material del sistema estructural.

Identificar la configuración en planta y en elevación de los edificios.

Constatar el número de plantas.

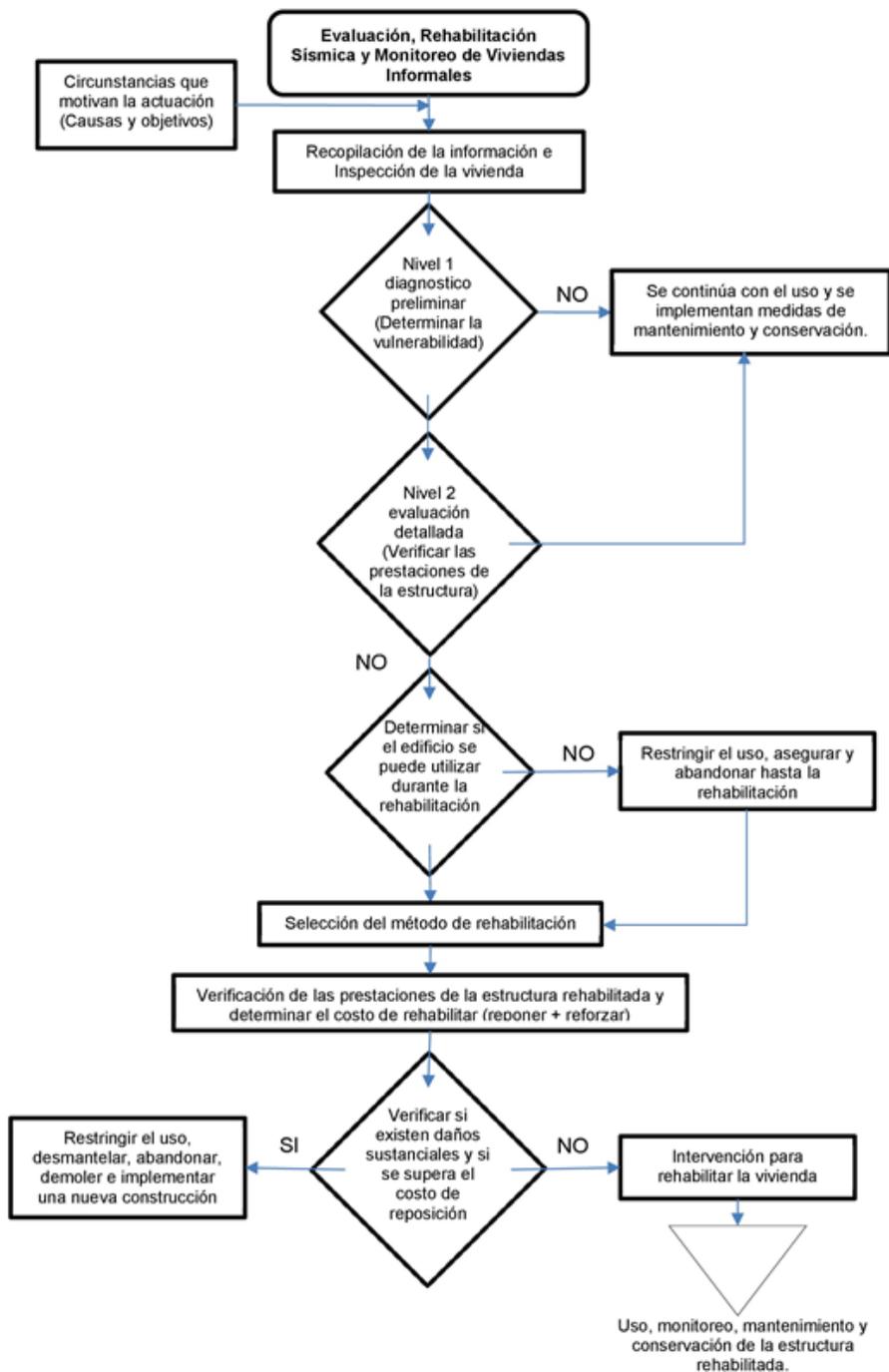
Identificar las deficiencias estructurales.

Identificar los daños.

Recepción: 14/11/2024 / Revisión:15/12/2024 / Aprobación: 13/01/2025 / Publicación: 27/02/2025

Figura 1

Metodología de evaluación, rehabilitación sísmica y monitoreo de viviendas informales.



Nota. En la figura se presenta el proceso propuesto para evaluar y rehabilitar viviendas informales. Adaptado de (FEMA-356, 2000; FEMA P-154, 2015; ASCE 41, 2017; MIDUVI, 2015a; Hazus, 2022). Elaboración propia.

Para determinar la calidad de materiales y sus características mecánicas; se realizarán ensayos no destructivos que incluyen:

Estudio esclerométrico, mediante el uso de un esclerómetro se realizan ensayos para determinar la dureza y la resistencia a la compresión del concreto de los elementos principales del sistema estructural como son columnas, muros, vigas y losas.

Levantamiento en sitio del Acero de refuerzo, mediante ensayos con profoscopio (escáner de acero de refuerzo) se determina la posición, tamaño y disposición de varillas de acero de refuerzo.

Estudio de vibraciones e instrumentación de la estructura, Mediante acelerómetros de alta precisión colocados en la estructura se miden vibraciones para determinar el periodo de vibración de las edificaciones y su comportamiento modal.

En cuanto a los ensayos destructivos, solamente de presentarse la necesidad ineludible de evaluar destructivamente, se debe coordinar previamente con el propietario la factibilidad de extraer núcleos de miembros de hormigón armado o toma de probetas de acero.

Se conoce históricamente que en Ecuador que el Instituto Ecuatoriano de Normalización en 1977 publicó el Ecuatoriano de la Construcción (CEC) con recomendaciones para el diseño sismorresistente y construcciones de hormigón armado (INEN, 1977). Posteriormente, el INEN publicó el código de práctica ecuatoriano, Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC) CPE INEN 5:2001 (INEN, 2001) y en la actualidad, está vigente la NEC-15, publicada por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) que entró en vigor desde el año 2015 para todo el territorio nacional (MIDUVI, 2015a).

Las características mecánicas de los materiales utilizados para construir edificios de hormigón armado tradicionalmente en la ciudad de Quito para la cimentación, columnas, vigas y losas, alcanzan una resistencia a la compresión del hormigón $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y para el acero de refuerzo $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$; antes del año 2000 existía la posibilidad de utilizar acero de refuerzo $f_y = 2800 \text{ kg/cm}^2$. Las mamposterías de ladrillo hueco o bloque pesado suelen tener una densidad de 780 kg/m^3 , con $f'_m = 40 \text{ kg/cm}^2$, módulo de elasticidad $E_m = 900 f'_m = 36000 \text{ kg/cm}^2$ y módulo de corte $G = 14400 \text{ kg/cm}^2$.

La carga permanente suele acercarse a los 1000 kg/m^2 , que contempla el peso propio de las losas, vigas, columnas, el terminado de piso, falso techo, instalaciones y paredes. La carga de uso o carga viva para losas de cubiertas y entrepisos se considera de 200 kg/m^2 .

Evaluación estructural

Se define las circunstancias que motivan la evaluación estructural, entre ellas están:

La sospecha e identificación de deficiencias en el sistema estructural resistente de cargas verticales.

La sospecha e identificación de deficiencias en el sistema resistente de cargas horizontales.

Dudas al respecto del estado actual de la estructura al haber estado sometida a condiciones límite como asentamientos diferenciales, sismos, etc.

Cuando se pretende registrar, regularizar, validar o aprobar una construcción informal por parte de la municipalidad.

Cuando se pretende cambiar el uso de la edificación.

Para la evaluación son aplicables las recomendaciones de la norma FEMA P-154 (FEMA, 2015), el Manual de procedimiento administrativo y técnico para la evaluación de las edificaciones (MIDUVI, 2022), y la norma ASCE 41 (ASCE, 2017), adaptados para cumplir con los requerimientos de la NEC-15 (MIDUVI, 2015a) y las buenas prácticas de ingeniería aplicables en la localidad. Los niveles de evaluación propuestos son:

Nivel 1 o diagnóstico preliminar: Este nivel de evaluación es aplicable a todas las edificaciones y se realiza con base en los documentos de construcción que estén disponibles, registros de estudios previos e inspecciones visuales para verificar las condiciones existentes, identificar alteraciones o desviaciones significativas en los documentos, completar los documentos, confirmar la calidad de la construcción y su conservación, y para obtener toda la información requerida en el formulario de evaluación visual rápida o preliminar. Se requiere una evaluación detallada del sistema estructural cuando el puntaje obtenido en el formulario es inferior a 2. Se recomienda realizar una evaluación detallada si se identifica deterioro o daño significativo del sistema estructural, riesgo geológico o suelo tipo F, construcción informal, Irregularidad en Planta (torsión), irregular en elevación, asentamientos diferenciales en la base del edificio, el edificio está inclinado fuera del plano, el edificio está adosado con entresijos desfasados. Se recomienda realizar una evaluación detallada de los elementos no estructurales si la vivienda incluye parapetos y/o chimeneas sin arriostramiento, o si tiene antepechos de mampostería en cubierta y/o balcones (Figura 2).

Nivel 2 o evaluación detallada: Este nivel de evaluación es aplicable a todas las viviendas que se hayan construido de manera informal y no correspondan a ninguno de los tipos de edificios considerado en la normativa ecuatoriana de la construcción vigente en el año de construcción. Este nivel de evaluación consiste en analizar con mayor detalle el comportamiento estructural de los edificios mediante la realización de modelos matemáticos lineales y/o no lineales para determinar

el desempeño estructural de las edificaciones. Los resultados de esta evaluación se utilizan para establecer soluciones de rehabilitación estructural.

Sobre los objetivos de desempeño para la evaluación y rehabilitación sísmica de las viviendas, se considera que los edificios de vivienda pertenecen a una categoría de riesgo II de acuerdo con la norma ASCE41(ASCE, 2017) y de acuerdo con la NEC-15 (MIDUVI, 2015a) se pueden considerar como una estructura de tipo ordinaria que no es parte de las edificaciones consideradas como esenciales o de ocupación especial. Por lo anterior, se selecciona conservadoramente para el análisis un objetivo de desempeño de Seguridad de Vida 3-C (Tabla 1), asociado a un nivel de amenaza sísmica BSE-1E (Tabla 2). Para alcanzar el nivel de desempeño seleccionado, los componentes estructurales de la edificación deben cumplir los requerimientos para el nivel de desempeño estructural de seguridad de vida (S-3) y los componentes no estructurales de la edificación deben cumplir con los requerimientos para el nivel de desempeño no estructural de seguridad de vida (N-C).

El nivel de desempeño (S-3) considera un estado de daño posterior al sismo en el que la estructura tiene componentes dañados, pero conserva un margen de seguridad contra el inicio de un colapso parcial o total. Este margen se define cuando los elementos que soportan cargas gravitacionales se encuentran funcionando, aunque existan fallas en muros dentro de su plano, deriva residual, daños en paredes divisorias y se considera que la reparación es viable en términos económicos. Existe la posibilidad de caída de objetos no estructurales y se espera que los sistemas arquitectónicos, mecánicos, eléctricos e hidrosanitario tengan daños extensos. El nivel de desempeño (N-C) es un estado de daño posterior al sismo en el que los componentes no estructurales pueden resultar dañados, pero el daño no representa una amenaza para la seguridad de la vida.

Figura 2

Formulario de Evaluación de Nivel 1 – Diagnóstico preliminar de vulnerabilidad.

Recepción: 14/11/2024 / Revisión: 15/12/2024 / Aprobación: 13/01/2025 / Publicación: 27/02/2025

EVALUACIÓN DE NIVEL 1 - DIAGNÓSTICO PRELIMINAR DE VULNERABILIDAD (ADAPTADO DE FEMA P-154)														
DATOS DE LA EDIFICACIÓN														
FOTOGRAFÍA	Clave catastral:			Predio:										
	Dirección:													
	Tipo de uso: VIVIENDA			Fecha de evaluación:			Año de construcción:							
							<input type="checkbox"/> Estimado							
	Año de remodelación:			Área construida m ² :			Número de pisos:							
	TIPO DE EVALUACIÓN VISUAL													
	<input type="checkbox"/> Exterior			<input type="checkbox"/> Interior			<input type="checkbox"/> Se revisaron planos							
	HALLAZGOS Y DEFICIENCIAS													
	<input type="checkbox"/> Deterioro o daño significativo del sistema estructural													
<input type="checkbox"/> Riesgo geológico o suelo tipo F														
<input type="checkbox"/> Construcción informal														
<input type="checkbox"/> Irregularidad en Planta (torsión)														
ESQUEMAS EN PLANTA Y ELEVACIÓN	Irregularidades en elevación			<input type="checkbox"/> Piso débil			<input type="checkbox"/> Irregularidad Geométrica							
				<input type="checkbox"/> Piso flexible			<input type="checkbox"/> Distorsión en masa							
				<input type="checkbox"/> Discontinuidad vertical			<input type="checkbox"/> Columnas cortas							
	Subsidiencias			<input type="checkbox"/> Asentamientos diferenciales en la base del edificio										
				<input type="checkbox"/> El edificio esta inclinado fuera del plano										
	Edificios Adyacentes			<input type="checkbox"/> Edificio adosado esquinero con entrepisos desfasados										
				<input type="checkbox"/> Edificio adosado con entrepisos desfasados										
				<input type="checkbox"/> Edificios adyacentes con diferentes numeros de pisos										
	Componentes no estructurales			<input type="checkbox"/> Parapetos y/o chimeneas sin arriostramiento										
				<input type="checkbox"/> Antepechos de mampostería en cubierta y/o balcones										
SISTEMA ESTRUCTURAL (TIPOS COMUNES DE EDIFICIOS)														
<input type="checkbox"/> W1	Pórticos livianos de madera			<input type="checkbox"/> S1	Pórticos de acero resistentes a momentos (MRF)			<input type="checkbox"/> S2	Pórticos de acero arriostrados (BR)					
<input type="checkbox"/> S3	Estructuras metálicas livianas (Perfiles conformados) (LM)			<input type="checkbox"/> S4	Pórticos de acero con muros de corte de homigón (RCSW)			<input type="checkbox"/> S5	Pórticos de acero rellenos con mampostería no reforzada (URM INF)					
<input type="checkbox"/> C1	Pórticos de homigón armado resistentes a momento (MRF)			<input type="checkbox"/> C2	Muros de corte de homigón armado (SW)			<input type="checkbox"/> C3	Pórticos de homigón armado con mampostería de relleno (URM INF)					
<input type="checkbox"/> PC	homigón Armado prefabricado			<input type="checkbox"/> RM1	Paredes portantes de mampostería reforzada con diafragmas flexibles de piso y techo (FD)			<input type="checkbox"/> RM2	Paredes portantes de mampostería reforzada con diafragmas rígidos de piso y techo (RD)					
<input type="checkbox"/> URM	Paredes portantes de mampostería no reforzada			<input type="checkbox"/> IA	Incluye Adiciones			<input type="checkbox"/> NC	No corresponde a un tipo comun de edificio					
PUNTAJES BÁSICOS, MODIFICACIONES Y PUNTAJE FINAL														
Tipología del sistema estructural	W1	S1	S2	S3	S4	S5	C1	C2	C3	PC	RM1	RM2	URM	
Puntaje básico	3.6	2.1	2	2.6	2	1.7	1.5	2	1.2	1.6	1.7	1.7	1	
IRREGULARIDAD DE LA EDIFICACIÓN														
Irregularidad vertical severa (VL1)	-1.2	-1	-1	-1.1	-1	-0.8	-0.9	-1	-0.7	-1	-0.9	-0.9	-0.7	
Irregularidad vertical moderada (VL1)	-0.7	-0.6	-0.6	-0.7	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.4	-0.6	-0.5	-0.5	-0.4	
Irregularidad en planta	-1.1	-0.8	-0.7	-0.9	-0.7	-0.6	-0.6	-0.8	-0.5	-0.7	-0.6	-0.7	-0.4	
CÓDIGO DE LA CONSTRUCCIÓN														
Pre- código (construido antes de 1977) o construcc	-1.1	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.2	-0.4	-0.7	-0.1	-0.5	-0.5	-0.5	0	
Construido en etapa de transición (entre 1977 y 2001)	-1.1	-0.6	-0.6	-0.8	-0.6	-0.2	0	0	0	-0.5	0	0	0	
Post código moderno (construido entre 2001 y 2015)	0	0	0	0	0	0	1.9	2.1	0	0	2.1	2.1	0	
Post código moderno (construido a partir de 2015)	0	1.4	1.4	1.1	1.9	0	1.9	2.1	0	2	2.1	2.1	0	
TIPO DE SUELO														
<input type="radio"/> Tipo de suelo A ó B	0.1	0.4	0.6	0.1	0.6	0.5	0.4	0.5	0.3	0.6	0.5	0.5	0.3	
<input type="radio"/> Tipo de suelo C ó D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<input type="radio"/> Tipo de suelo E	De 1 a 3 pisos	0.2	-0.2	-0.4	0.2	-0.1	-0.4	0	0	-0.2	-0.3	-0.1	-0.2	
	Mayor 3 pisos	-0.3	-0.6	-0.6	0	-0.6	-0.4	-0.5	-0.7	-0.3	0	-0.5	-0.6	
PUNTAJE MÍNIMO	1.1	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3	0.2	
PUNTAJE FINAL														
GRADO DE VULNERABILIDAD														
S ≤ 2.0	Vulnerabilidad Alta, requiere evaluación detallada													
2.0 < S < 2.5	Vulnerabilidad Media													
S ≥ 2.5	Vulnerabilidad Baja													
Observaciones:														
- Se requiere una evaluación detallada del sistema estructural, el puntaje obtenido es inferior al límite, la edificación tiene vulnerabilidad Alta .														
- Se recomienda realizar una evaluación detallada si se identifica deterioro o daño significativo del sistema estructural, riesgo geológico o suelo tipo F, construcción informal, Irregularidad en Planta (torsión), Irregular en elevación, asentamientos diferenciales en la base del edificio, el edificio esta inclinado fuera del plano, el edificio está adosado con entrepisos desfasados.														
- Se recomienda realizar una evaluación detallada de los elementos no estructurales si la vivienda incluye parapetos y/o chimeneas sin arriostramiento, o si tiene antepechos de mampostería en cubierta y/o balcones.														
Asistente de Evaluación	Evaluador						Aprobado por							

Nota. Los puntajes para cada tipo de edificio se han modificado considerando que históricamente las normativas ecuatorianas no incluyen recomendaciones para el diseño sísmico de edificios de madera, mampostería, pórticos con mampostería de relleno ni prefabricados de concreto. Adaptado de FEMA P-154.

Tabla 1

Objetivos de desempeño para la evaluación y rehabilitación de viviendas informales.

Categoría de Riesgo	BSE-1E	Componentes estructurales	Componentes estructurales	NO
I y II	(3-C)	(S-3)	(S-3)	

Nota. Se presentan los objetivos de desempeño estructural aplicables para la evaluación y rehabilitación de viviendas informales. Autoría propia.

Tabla 2

Niveles de amenaza sísmica para la evaluación y rehabilitación de viviendas informales.

Evento Sísmico	Periodo de retorno promedio (años)
Ocasional (moderado). 20%/50años (BSE-1E)	225
Raro (severo). 10%/50años (BSE-1N)	475

Nota. Se presentan los niveles de amenaza sísmica aplicables para la evaluación y rehabilitación de viviendas informales. Autoría propia.

Se acepta un mayor riesgo para el estudio de las viviendas debido a las siguientes razones:

Se considera un desempeño inferior al especificado en la NEC-15 en su capítulo NEC-SE-DS para edificaciones nuevas (MIDUVI, 2015a) para garantizar que la exigencia sobre la estructura rehabilitada sea menor que para una obra nueva similar con diseño y construcción adecuada. El capítulo NEC-SE-RE de la NEC-15 no cuenta con definiciones para una estructura de tipo ordinaria (MIDUVI, 2015b), por tanto, se consideran para el análisis las recomendaciones de la norma ASCE 41 para estructuras de tipo ordinario (ASCE, 2017).

Un edificio existente suele tener una vida útil más corta que un edificio nuevo. Para edificios nuevos se supone una vida útil de 50 años y para un edificio rehabilitado se considera una vida útil

de entre 25 y 30 años, el edificio rehabilitado tiene una menor probabilidad de experimentar un sismo raro durante sus años restantes.

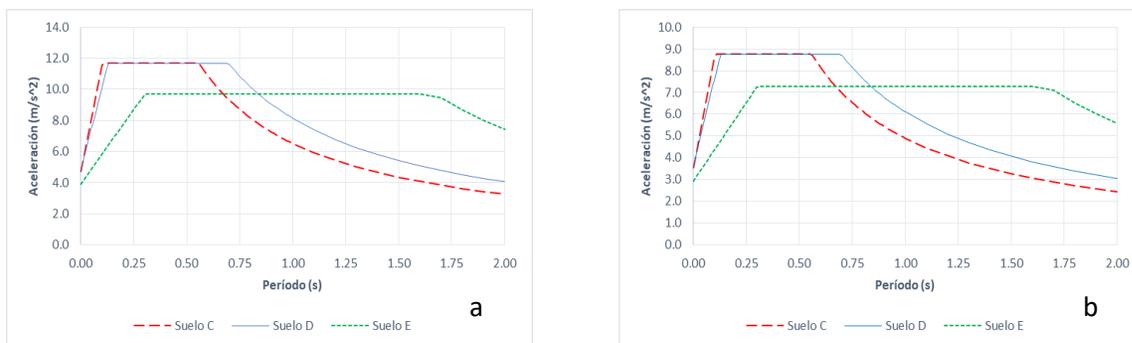
Se reconoce que existe una gran posibilidad de que los costos de rehabilitación para alcanzar una mayor certeza en el desempeño conlleven la equivalencia con edificios nuevos superando los costos de una obra nueva sin alcanzar los mismos beneficios.

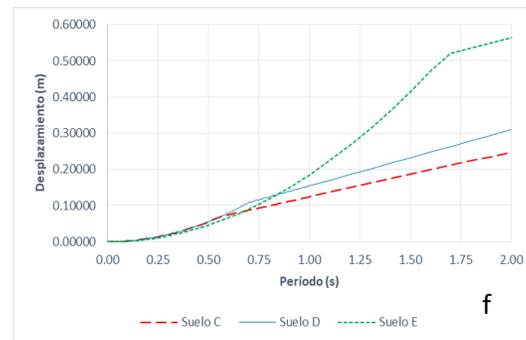
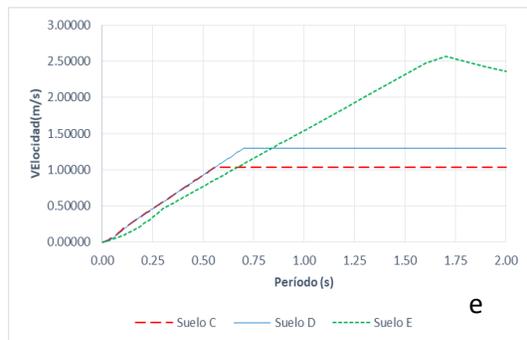
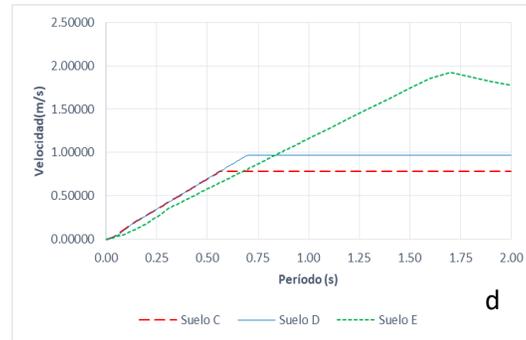
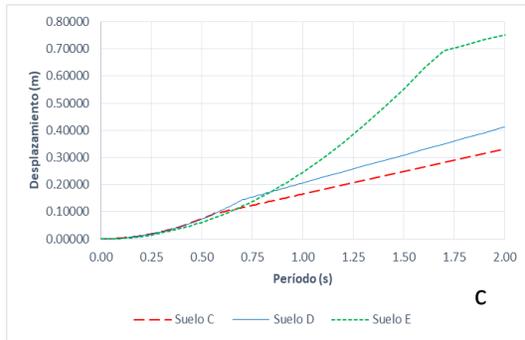
Con base en los criterios anteriores se presenta los espectros de aceleración, velocidad y desplazamientos para una amenaza sísmica de nivel (BSE-1E) y se comparan con un nivel de amenaza sísmica de diseño para edificios nuevos (BSE-1N) (Figura 3).

Sobre la evaluación y rehabilitación sísmica de las viviendas, se parte de estudiar la amenaza o peligrosidad sísmica de acuerdo con los requerimientos establecidos en la NEC-15, se determinan los espectros de respuesta de los movimientos esperados. Luego se caracteriza el parque inmobiliario con base en la información secundaria y primaria obtenida en el proceso de recopilación de información y los procedimientos de evaluación de nivel 1 (diagnóstico preliminar), se caracterizan las edificaciones en la zona de estudio identificando el sistema estructural por ejemplo pórticos de hormigón armado rellenos con paredes de mampostería sin refuerzo Tipo C3 de acuerdo con la clasificación propuesta por FEMA 178 (FEMA, 1992), se asigna las clases de vulnerabilidad de acuerdo con las tipologías y para pasar de peligrosidad y vulnerabilidad a riesgo, se construyen curvas de fragilidad.

Figura 3

Espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento para Quito (Suelo tipo C, D y E).





Nota. Las figuras muestran los espectros de aceleración para un sismo BSE-1N (a) y BSE-1E (b); espectros de velocidad para un sismo BSE-1N (c) y BSE-1E (d); y espectros de desplazamiento para un sismo BSE-1N (e) y BSE-1E (f) (MIDUVI, 2015a).

Para cuantificar el daño que podrían sufrir las construcciones se construyen curvas de fragilidad, para ello se determina previamente la curva de capacidad para la tipología estructural de acuerdo con lo propuesto de Hazus (FEMA, 2022). Cuando no es posible identificar la tipología estructural se elabora un modelo matemático con elementos finitos tipo barra para columnas, vigas y elementos tipos link para simular las mamposterías, se analiza el edificio mediante un análisis no lineal tipo pushover para obtener la curva de capacidad global y de cada planta. Para el modelo numérico se definen las columnas y vigas como elementos finitos de tipo barra con un modelo de plasticidad concentrada integrado de acuerdo con ASCE 41 (ASCE, 2017). Para el modelo se incluyen las mamposterías como bielas, que se trata de un macro modelo simplificado con una sola diagonal que trabaja únicamente en compresión y une dos pisos adyacentes, para determinar las características de la diagonal equivalente se utiliza las expresiones adoptadas por FEMA 356 (FEMA, 2000).

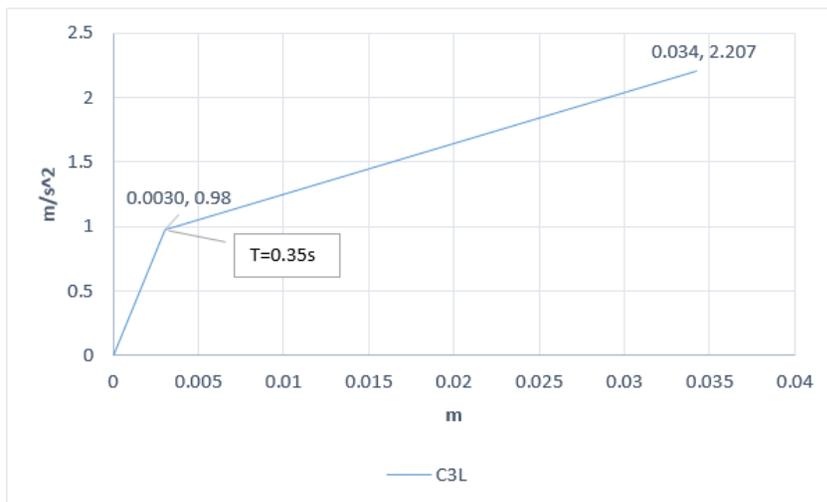
El análisis estático no lineal (pushover analysis) consiste en mantener constantes las cargas de gravedad e ir incrementando progresivamente las fuerzas laterales o los desplazamientos laterales de piso hasta alcanzar el fallo de la estructura. La distribución de fuerzas y desplazamientos obedece por lo general a un patrón de distribución que puede ser uniforme, triangular invertido o puede estar en función de la distribución modal. Para el análisis es recomendable aplicar una

distribución de acuerdo con el primer modo de vibración para la dirección transversal y con el segundo modo de vibración para la dirección longitudinal. Dos de los métodos más comunes para la idealización de la curva de capacidad son los propuestos por ATC-40 (1996) y FEMA-273 (1997), esta última posteriormente reemplazada por la FEMA-356 (FEMA, 2000).

Se estima la probabilidad de que la edificación alcance un determinado nivel de daño ante la acción sísmica BSE-1E de acuerdo con la NEC-15. Para el cálculo se aplica el Método de Coeficiente de Desplazamiento Mejorado (IDCM) de acuerdo con FEMA 440 (FEMA, 2005), se estima el desplazamiento global máximo (δ), que es la suma de desplazamientos elástico e inelástico. Para cada clase de vulnerabilidad y nivel de la acción sísmica se calculan curvas de fragilidad considerando la escala de daño propuesta por Hazus (FEMA, 2022) con cuatro niveles de daño: Leve, Moderado, Extenso y Completo. Para estimar la probabilidad de daño se relaciona las demandas de desplazamiento global (δ) con las curvas de fragilidad considerando un tipo de suelo (Figura 4).

Figura 4

Curva de capacidad para estructuras tipo C3



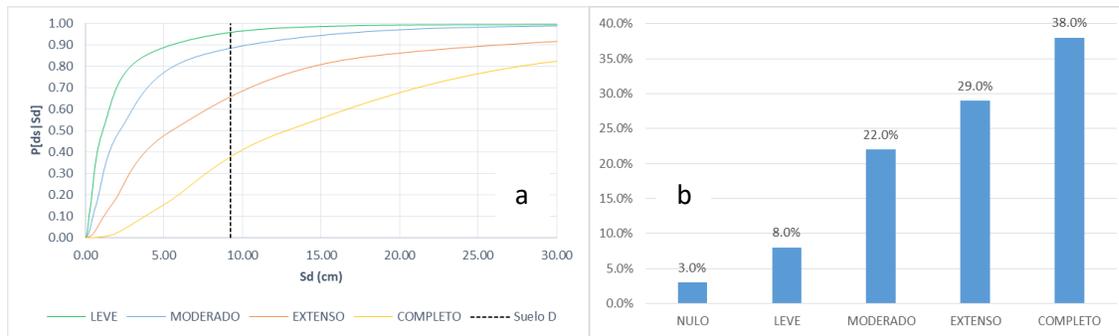
Nota. Se muestra la curva de capacidad calculada de acuerdo con lo propuesta de Hazus (FEMA, 2022) para una estructura tipo C3 de acuerdo con la clasificación propuesta por FEMA 178 (FEMA, 1992), para el cálculo se considera que se trata de estructuras de hasta 3 pisos con pórticos de hormigón armado rellenos con mampostería sin refuerzo y construidas antes del 2015. Elaboración propia.

Las curvas de fragilidad son curvas que en función del movimiento esperado en las abscisas y permiten obtener la probabilidad de daño en las ordenadas para cada clase de vulnerabilidad. Se

ingresa a las curvas con la peligrosidad y la vulnerabilidad, y se obtiene el grado de pérdidas esperadas, en términos de daño físico. Para los estudios se recomienda presentar las curvas de fragilidad en términos del porcentaje de edificios que van a experimentar colapso, daño severo o daño moderado (Figura 5).

Figura 5

Curvas de fragilidad y probabilidades de daño para estructuras C3, suelo D y evento BSE-1E



Nota: Para cada clase de vulnerabilidad y nivel de la acción sísmica se calculan curvas de fragilidad considerando la escala de daño propuesta por Hazus (FEMA, 2022) con cuatro niveles de daño: Leve, Moderado, Extenso y Completo (a). Para estimar la probabilidad de daño se relaciona las demandas de desplazamiento global (δ) con las curvas de fragilidad, considerando un tipo de suelo específico. Elaboración propia.

Etapas 2 – Diseño de la solución para la rehabilitación estructural

En esta etapa se establece la solución para rehabilitar la vivienda. Las soluciones comprenden la elaboración de un informe, planos constructivos en los que se identifiquen las deficiencias y las soluciones constructivas con un nivel de detalle suficiente para que se puedan implementar y planos de detalles típicos para el proyecto. Antes de pensar en estrategias de rehabilitación es necesario distinguir si el edificio tiene daño producto de asentamientos diferenciales o por la ocurrencia de sismos, en cualquiera de los casos cuando el edificio tiene daños es necesario en una primera etapa restituir las presentaciones perdidas, para ellos son aplicables los procedimientos propuestos por FEMA 306 (FEMA, 1998).

Una vez se hayan evaluado las prestaciones de un edificio para el nivel de acción sísmica determinado se deberá decidir sobre la manera de intervenir para rehabilitar teniendo en cuenta los siguientes criterios:

Las deficiencias estructurales y no estructurales deben ser atendidas.

Se debe solucionar los problemas de irregularidad de rigidez y masa.

Se debe incrementar la resistencia y/o la ductilidad.

Para intervenir los edificios se definen dos tipos de acciones a nivel local y global. Las intervenciones a nivel local afectan únicamente la capacidad de los elementos estructurales que se intervienen en términos de deformación, ductilidad, resistencia o rigidez. A nivel global la intervención afecta la capacidad y la demanda incrementando la resistencia y la rigidez, en este caso un incremento de la curva de capacidad es evidente.

Los objetivos de la rehabilitación a considerarse en la elección y diseño de la estrategia de rehabilitación son:

Seguridad de vida de los usuarios.

Mejora del desempeño sísmico.

Operación adecuada después de la rehabilitación.

Costo de intervención menores a los de reposición.

Apariencia y estética aceptable.

Las estrategias aplicables para la propuesta de solución consideran:

Modificación global del edificio o local de los elementos estructurales.

Adición de nuevos elementos estructurales.

Modificación del sistema estructural.

Adición de un nuevo sistema estructural sismorresistente.

Transformación de elementos no estructurales en elementos estructurales.

Reducción de la masa.

Restricción o cambio de uso del edificio.

Demolición parcial o total.

Para validar las propuestas de rehabilitación sísmica se evalúa el desempeño sísmico de la estructura rehabilitada realizando análisis dinámicos no lineales, caracterizando la amenaza sísmica mediante la energía que contribuye a daños estructurales expresada en términos de velocidad equivalente con base en peligro sísmico determinado en la NEC-15 (MIDUVI, 2015) para ello se

utilizan 7 registros sísmicos históricos escalados de acuerdo con el input de energía y se compara las derivas máximas calculadas con los límites de deriva propuestos por FEMA-356 para definir los diferentes niveles de daño asociados a las derivas de piso (Tabla 3). Cuando el método de rehabilitación está gobernado por la estrategia de incrementar la rigidez y la resistencia de las construcciones por ejemplo al utilizar enchapes de concreto con malla electrosoldada sobre la mampostería, se puede realizar un análisis estático lineal o modal espectral para calcular las deformaciones considerando un factor de reducción de la respuesta sísmica $R=1$ (MIDUVI, 2015a), derivas y el desempeño estructural, para este caso los límites de deriva asociados al desempeño corresponden a estructuras con ductilidad limitada o No dúctiles.

Tabla 3

Criterios para evaluar el desempeño estructural.

Referencia	Cercano colapso	al Daño extenso (seguridad de vida)	Daño moderado (operacional)	Poco daño (completamente operacional)
FEMA-356	2.5%	1.5%	0.5%	0.2%
Ghobarah (2004) (No dúctiles)	>1%	0.8%	<0.5%	0.2%
Ghobarah (2004) (Dúctiles)	>3%	1.8%	<1.0%	0.4%

Nota. Se presentan los criterios de derivas para evaluar el desempeño estructural de estructuras dúctiles y no dúctiles propuestos por FEMA 356 (FEMA, 2000) y Ghobarah (2004).

Las estrategias de rehabilitación que se implementen a nivel local y global, mejoran del desempeño sísmico de las construcciones sin embargo muchas de las construcciones informales se construyen en bloques conformados con varias viviendas adosadas. Las viviendas existentes adosadas de manera general cuentan con juntas de construcción cerradas en total contacto, esta separación entre edificios impide que las construcciones vibren o se deformen de manera independiente, por lo que para este caso se necesita analizar la interacción entre edificios ante un movimiento producido por un sismo o por los fenómenos de asentamientos diferenciales, que hacen que los edificios se golpeen unos contra otros, cuando existen grandes desfases de los niveles de entrepiso el golpeteo causa daños concentrados en las columnas, cuando no existe el desfase las presiones de contacto entre construcciones se transfieren entre losas de entrepiso haciendo que las viviendas se empujen entre si siendo las más afectadas las que se localizan en las esquinas de cada bloque.

Las principales deficiencias asociadas a la ocurrencia de asentamientos diferenciales en la construcción y sismos son las fisuras. Las fisuras son el síntoma principal a tener en cuenta durante la evaluación y la rehabilitación, ya que son consecuencia de un estado tensional límite y su

existencia es un indicativo de tensiones y daño en la edificación. Previo a establecer las estrategias de rehabilitación se debe considerar estabilizar la propagación de fisuras, especial cuando se han detectado asentamientos diferenciales. Tanto las fisuras en los elementos de hormigón armado y paredes deben considerarse inactivas para poder implementar las estrategias de rehabilitación.

Sobre la forma de aparición, las fisuras aisladas en las paredes son de naturaleza mecánica, son peligrosas y responden a efectos de flexión y cortante en las paredes; las fisuras en familias o en redes están asociadas a fenómenos muy superficiales en las paredes. Sobre la forma de la fisura, si se considera a una fisura como un tensor o un vector, al considerar su dirección (horizontal, vertical o inclinada) y el punto de origen, se puede determinar las tensiones internas que la han ocasionado y establecer el sentido de propagación. El apareamiento de fisuras inclinadas está asociado con la ocurrencia de un asentamiento diferencial.

Sobre la actividad, las fisuras pueden mostrarse estabilizadas o no activas y haber aparecido por causa de que la construcción encontró un nuevo estado de equilibrio, pero es posible que se encuentren vivas o activas, es decir, en crecimiento. Sin embargo, al tratarse de un asentamiento existe una alta probabilidad de estar inactivas al haberse alcanzado un nuevo estado de equilibrio luego de producido el fenómeno, se recomienda monitorear las fisuras previo a cualquier intervención para garantizar su inactividad.

Sobre la agresividad, las fisuras en las paredes que no siguen la dirección de las juntas de los morteros se consideran que han producido un cizallamiento en el ladrillo – bloque. Como las fisuras han roto el ladrillo – bloque junto con los morteros, sobre todo en las fisuras que se ven en ambos lados de la pared, existe una alta probabilidad de que el asentamiento o el evento sísmico haya sido brusco. Cuando los bordes de las fisuras están separados indica que las fisuras están descargadas, se presentan separaciones en los semiplanos por lo que se evidencian giros y torsiones provocadas por fuerzas exteriores al plano de las paredes y dirigidas hacia el mismo.

Un punto que define si es factible implementar las estrategias de rehabilitación es el análisis de costos. Como parte de los estudios se determina el costo de rehabilitación que incluye el costo de reposición o reparación más el costo de reforzamiento. El costo de reposición está asociado a recuperar las prestaciones de la edificación cuando se evidencian daños, este costo se compara con el avalúo catastral de la edificación y se determina si la construcción ha sufrido daños sustanciales; se considera que una edificación ha sufrido daños sustanciales cuando el costo de reposición sobrepasa el 50% del valor de su avalúo catastral (FEMA, 2021), en este caso se recomienda demoler la construcción y no reparar. Así mismo, si el costo de rehabilitación es mayor que el valor del avalúo catastral, se recomienda demoler la construcción y no rehabilitar; la decisión final de demoler o rehabilitar será del propietario, así como aceptar el porcentaje mencionado anteriormente, pudiendo aumentarlo, de acuerdo con los intereses y la economía del propietario.

Etapa 3 – Monitoreo estructural y reporte ejecutivo

Monitoreo estructural

El objetivo de implementar un plan de monitoreo junto con las estrategias de rehabilitación es contribuir a la mejor comprensión del desempeño estructural de la construcción, definiendo la frecuencia y las acciones necesarias que deben realizarse antes y después de que la construcción haya sido rehabilitada.

Cuando se evidencia daño en la construcción debido a la ocurrencia de sismos y/o asentamientos diferenciales, se deben monitorear las fisuras anualmente o al menos una vez antes de implementarse las estrategias de rehabilitación para comprobar que las fisuras permanecen inactivas.

Cuando se han implementado las estrategias de rehabilitación es recomendable que se valide el comportamiento de la estructura rehabilitada luego de 6 meses hasta 1 año mediante inspecciones para realizar una evaluación visual rápida y un estudio de vibraciones para medir las variaciones en respuesta dinámica de la estructura.

Los estudios de vibraciones son un complemento para el monitoreo, se realizan fundamentalmente para medir y comprender el comportamiento dinámico estructural, estos estudios se concentran en determinar el periodo de vibración fundamental y los modos de vibración principales, que son dependientes de la masa y la rigidez de la estructura.

Para medir las vibraciones se necesita un sistema de adquisición de datos que se compone de los instrumentos que por ejemplo registran la aceleración y la tarjeta de adquisición de datos, que es la que determina la sensibilidad y la amplificación que es capaz de sostener sistema. Existen tres tipos de acelerómetros disponibles en el mercado: capacitivos o de voltaje, piezoeléctricos, y MEMs (mechanical and electrical measurements, en castellano, mediciones mecánicas y eléctricas). Cualquiera de los tipos de acelerómetros mencionados puede utilizarse ya sean uniaxiales, biaxiales o triaxiales. Sin embargo, puede resultar conveniente instalar los acelerómetros piezoeléctricos en áreas con gran cantidad de mampostería debido a la pérdida de señal aérea de los tipos MEMs en cuanto a la conectividad sin cables; y los tipos MEMs pueden ubicarse con mayor facilidad en áreas de difícil acceso en las que resulta complicado implementar la conectividad con cables.

Existen tres parámetros que limitan la selección del sistema de adquisición de datos:

Frecuencia de muestreo y número de canales: Es la discretización de la escala temporal en incrementos de tiempos constantes, $f_s = 1/\Delta t$ siendo Δt el intervalo en el tiempo seleccionado para el análisis.

Rango de adquisición de datos: valor pico a pico que se puede medir, $V_{pico} = -2 \text{ g a } +2 \text{ g}$.

Resolución: es el número de bits que se dispone en el sistema digital para representar el rango, el número de divisiones de la escala vertical, $\Delta V = 2 * V_{pico} / 2^n$, donde n es el número de bits.

La frecuencia de muestreo debe ser mayor al doble de la frecuencia de interés, en Ingeniería Sísmica aplicada a edificios, las frecuencias de interés suelen ser de 0.25 a 15 Hz por lo que la frecuencia de muestreo del instrumento no puede ser menor a 64Hz. Frecuencias de muestreo más bajas pueden superar la frecuencia de Nyquist y producirse un efecto aliasing, es decir la posibilidad de que una frecuencia dada pueda ser reemplazada por un submúltiplo de ella. A más de prever que la frecuencia de muestreo no supere la frecuencia de Nyquist, el sistema de adquisición de datos debe contar con un filtro anti aliasing que garantice que el sistema no considere energías cercanas a la frecuencia de Nyquist. El número de bits necesario para la adquisición de datos no debe ser menor a 24 y debe permitir que el sistema sea capaz de registrar el ruido que podría generar cada instrumento.

Los ensayos modales deben ser verificables y reproducibles, se deben realizar al menos 3 ensayos en las mismas condiciones con resultados similares para que el estudio de vibraciones se considere válido. Deben incluirse en la investigación tantos sensores uniaxiales como puntos de interés y la tarjeta de adquisición de datos debe ser capaz de soportar tantos canales como sensores se hayan seleccionado para el estudio. Se puede utilizar una menor cantidad de instrumentos si estos tienen características biaxiales o triaxiales, como referencia 2 sensores triaxiales por planta, uno en el centro de gravedad de la planta y otro en una de las esquinas para medir el comportamiento traslacional y de torsión.

El estudio de vibraciones debe considerar un tiempo de muestreo adecuado para que las frecuencias y los modos de vibración objetivo puedan registrarse en vibración libre, para lo que se definen las siguientes variables:

Tiempo de muestreo en segundos (dt),

Número de puntos (N),

Tiempo máximo ($\Delta t = dt * N$),

Frecuencia de muestreo ($df = 1 / \Delta t$)

Frecuencia máxima ($\Delta f = dt * N$),

Frecuencia de Nyquist ($\Delta f / 2$)

Para realizar los ensayos dinámicos es posible generar la excitación mediante:

Impacto: Pesos, vibración forzada, martillo instrumentado.

Excitador Electromagnético; Frecuencia – frecuencia

Ambiental: Tráfico, viento o sismos

Personas: Taconazo, marcha y salto o baile

Para simplificar los ensayos modales, se permite la selección de una menor cantidad de datos para el análisis. Sin embargo, es importante que la selección de datos sea ergódica, lo que significa que el registro seleccionado debe tener las mismas características estadísticas que el conjunto de registros.

El análisis de señales debe realizarse en el dominio de la frecuencia. En el dominio del tiempo se puede presentar el fenómeno de batimiento, que no es deseable para el análisis. Para el caso de un registro de aceleraciones aleatorias en el tiempo, los resultados del análisis de señal en el dominio de la frecuencia, permiten detectar mejor varios tipos de ondas componentes de la señal principal y, en escala logarítmica, se comprimen las señales altas y aumenta la representación de señales bajas, lo que permite ver la superposición de frecuencias con mayor claridad, esto es deseable para desarrollar el estudio de vibraciones y determinar el comportamiento modal.

Para el análisis, se puede aplicar uno de los siguientes métodos:

Transformada de Fourier - FFT (Fast Fourier Transform)

Densidad Espectral

Espectros de Respuesta

Funciones de Transferencia

Reporte ejecutivo

El reporte ejecutivo contendrá los principales resultados obtenidos en la evaluación estructural, las estrategias de rehabilitación y el plan de monitoreo de la salud estructural. Los apartados más relevantes del reporte incluyen:

Antecedentes

Alcance de los estudio y metodología

Peligro sísmico (acción sísmica)

Objetivos de desempeño para la evaluación y la rehabilitación sísmica

Información disponible

Resultado de las inspecciones y diagnóstico de las deficiencias

Geometría, materiales y sollicitaciones que actúan en los edificios

Ensayos no destructivos

Estrategias de rehabilitación sísmica

Evaluación de la capacidad resistente para la estructura rehabilitada

Evaluación del desempeño sísmico de la estructura rehabilitada

Conclusiones

Estrategias

Metodología para intervenir las zonas afectadas

Plan de intervenciones

Plan de monitoreo estructural

Presupuesto referencial

Recomendaciones

Anexos

Planos o esquemas

Especificaciones técnicas de los elementos utilizados para la rehabilitación

Reportes de ensayos no destructivos

Realización de cálculos

Modelos matemáticos

Discusión y conclusiones

Es probable que con un diagnóstico preliminar (evaluación de nivel 1) casi todas las construcciones informales sean vulnerables de acuerdo con una evaluación visual rápida como propone con la norma FEMA P-154 (FEMA, 2015) y el Manual de procedimiento administrativo y técnico para la evaluación de las edificaciones (MIDUVI, 2022); principalmente porque el sistema estructural de

una edificación informal no corresponde a uno de los tipos estandarizados que se proponen en las normas antes mencionadas, por lo que se requiere realizar una evaluación detallada en la mayoría de los casos.

La evaluación detallada (evaluación de nivel 2) permite cuantificar la probabilidad de sufrir daños ante la ocurrencia de un sismo ocasional (moderado) con un periodo de retorno de 225 años de acuerdo con la NEC-15 (MIDUVI, 2015a). Si la probabilidad de daño es alta para este nivel de amenaza sísmica, se requiere implementar estrategias de rehabilitación estructural y mejorar el desempeño sísmico de la construcción garantizando la seguridad de vida de sus habitantes.

Las soluciones que se propongan para rehabilitar las construcciones informales, ya sea mediante técnicas convencionales como es el caso de incorporar enchapes en las paredes o técnicas no convencionales como es incorporar disipadores de energía al sistema estructural, deben garantizar una mejora del desempeño sísmico de la edificación y cuando se trate de construcciones adosadas, con juntas de construcción inexistentes o menores a 5 centímetros estas deben analizarse en conjunto para garantizar una mejora del desempeño sísmico del conjunto de construcciones y evitar que la interacción entre ellas ocasione daños.

Referencias

- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2017). *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings ASCE 41*. Virginia, Estados Unidos: ASCE.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1992), *NEHRP Handbook for the Seismic Evaluation of Existing Buildings FEMA 178*. Estados Unidos: FEMA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (1998). *Evaluation of earthquake damaged concrete and masonry wall buildings FEMA 306*. Washington D.C., Estados Unidos: Applied Technology Council (ATC) & Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2000), *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 356*. Washington D.C., Estados Unidos: FEMA.
- Federal Emergency Management Agency [Agencia Federal para el Manejo de Emergencias] (FEMA) (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440*. Washington D.C., Estados Unidos: Applied Technology Council (ATC) & Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2015). *Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook FEMA P-154*. Washington D.C., Estados Unidos: Building Seismic Safety Council (BSSC).

Federal Emergency Management Agency [Agencia Federal para el Manejo de Emergencias] (FEMA) (2021). Determinaciones de daños sustanciales. Washington D.C., Estados Unidos: Building Seismic Safety Council (BSSC).

Federal Emergency Management Agency (FEMA) (2022), *Hazus Earthquake Model Technical Manual Hazus 5.1*. Estados Unidos: FEMA.

Ghobarah, A. (2004), “On drift limits associated with different damage levels”, International workshop on performance based seismic design. Department of Civil Engineering, Mc. Master University, June 28- July 1, 2004.

Guerrero, P., Mota-Páez, S., Escolano, D. (2024). Seismic Rehabilitation of a Soft Story Structure with Hysteretic Dampers. In: Saavedra Flores, E.I., Astroza, R., Das, R. (eds) Recent Advances on the Mechanical Behaviour of Materials. ICM 2023. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 462. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53375-4_12

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2024). *VIII Censo de Población y VII de Vivienda 2022*. Ecuador: INEC.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2017). *Anuario de Estadísticas de Edificaciones 2017*. Ecuador: INEC.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) (2019). *Encuesta de Edificaciones 2018*. Ecuador: INEC.

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) (1977). *Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC)*. Quito, Ecuador: INEN.

Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) (2001). *Código Ecuatoriano de la Construcción (CEC) CPE INEN 5:2001*. Quito, Ecuador: INEN.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2015a). NEC-SE-DS: Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente. *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)*. Ecuador: MIDUVI.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2015b). NEC-SE-RE: Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras. *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC)*. Ecuador: MIDUVI.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI) (2022), *Manual de procedimiento administrativo y técnico para la evaluación de las edificaciones de propiedad del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda*. Ecuador: MIDUVI.