



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL EN
COLUMNAS: EMPRESILLADO METÁLICO VS. ENCAMISADO EN CONCRETO. CASO DE
ESTUDIO: PROYECTO STAR HOME, MEDELLÍN.

Presentado por:

ING. JENIFFER LYDA SÁNCHEZ LONDOÑO
ING. ADRIANA ELIZABERTH FERNANDEZ MUÑOZ
ING. HUMBERTO RAFAEL MARÍN MILLAN

Director:

ING. OSMAR ALBERT GAMBA GÓMEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
DIVISIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRÍA EN PATOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN
2025

RESUMEN

La presente monografía evalúa comparativamente el desempeño estructural del empresillado metálico y el encamisado en concreto como técnicas de refuerzo en columnas de edificaciones medianas de concreto armado afectadas por patologías, aplicado al proyecto Star Home en Medellín.

Los resultados muestran que el encamisado en concreto proporciona el mayor incremento en capacidad a flexo-compresión (15%), reduce las derivas en un 20% y garantiza el cumplimiento del criterio "columna fuerte-viga débil" de acuerdo con la NSR-10. Aunque el empresillado metálico ofrece ventajas en tiempo de ejecución y costo inicial, el encamisado en concreto presenta mayor durabilidad a largo plazo, con un ciclo de vida superior a 40 años. Se recomienda su implementación en columnas con resistencias inferiores a 17 MPa para garantizar la seguridad estructural en eventos sísmicos.

PALABRAS CLAVE

Refuerzo estructural, vulnerabilidad sísmica, desempeño estructural, encamisado en concreto, empresillado metálico, seguridad sísmica.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	2
PALABRAS CLAVE.....	2
GLOSARIO.....	7
INTRODUCCIÓN.....	8
FORMULACION DEL PROBLEMA.....	8
PROBLEMA INVESTIGACIÓN.....	8
PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	8
HIPOTESIS.....	9
DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	9
JUSTIFICACIÓN.....	9
OBJETIVOS.....	9
GENERAL.....	9
ESPECIFICOS.....	9
MARCO TEORICO.....	10
TÉCNICAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL EN COLUMNAS.....	10
ENCAMISADO EN CONCRETO (CONCRETE JACKETING).....	10
EMPRESILLADO METÁLICO (STEEL JACKETING).....	11
TÉCNICAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL EN COLUMNAS.....	12
NORMATIVAS INTERNACIONALES PARA EL REFUERZO ESTRUCTURAL.....	13
FUNDAMENTOS DE LA EVALUACIÓN BASADA EN EL DESEMPEÑO.....	13
PRINCIPIOS DE DISEÑO POR CAPACIDAD EN LA REHABILITACIÓN.....	13
COMPARATIVA APLICADA DE CRITERIOS NORMATIVOS.....	13
ESTADO DEL ARTE.....	14
METODOLOGÍA.....	16
MARGEN DE ERROR Y SENSIBILIDAD.....	17
LIMITACIONES METODOLÓGICAS.....	17
PARÁMETROS DE ENTRADA Y MODELOS.....	17
RESULTADOS.....	18
SISTEMA ESTRUCTURAL.....	18
REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y NORMATIVAS APLICABLES.....	18
ESTUDIOS REALIZADOS.....	18
NORMATIVA APLICABLE.....	18
HISTORIA CLÍNICA (LESIONES Y DAÑOS IDENTIFICADOS).....	19
ENSAYOS REALIZADOS.....	19
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO.....	21
IMPLICACIONES DEL INCUMPLIMIENTO DE LA RESISTENCIA.....	21
IMPACTO EN EL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL.....	21
CUMPLIMIENTO DEL CRITERIO DE "COLUMNA FUERTE-VIGA DÉBIL".....	21
PÉRDIDA DE RIGIDEZ ESTRUCTURAL Y CAPACIDAD SÍSMICA.....	22
ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA.....	22
METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	23
DISEÑO DE ALTERNATIVAS DE REFUERZO EN COLUMNAS.....	25
RECRECIMIENTO EN CONCRETO.....	25

EMPRESILLADO METÁLICO	28
ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE REFORZAMIENTO	30
CONSTRUCTIBILIDAD.....	30
DESEMPEÑO ESTRUCTURAL.....	32
DURABILIDAD.....	33
COSTOS	34
DISCUSIÓN.....	36
COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ESTUDIOS PREVIOS	37
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
CONCLUSIONES.....	38
RECOMENDACIONES	38
BIBLIOGRAFIA.....	40
ANEXOS.....	41
ANEXO 1 – LEVANTAMIENTO DE LESIONES	41
RESUMEN DE FICHAS TÉCNICAS DE HISTORIA CLÍNICA	44
ANEXO 2 – RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO	46
ANEXO 3 – RESUMEN DE ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA	48

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Comparativa de requerimientos normativos</i>	14
Tabla 2. <i>Secciones de columnas (Original vs. Recrecida)</i>	25
Tabla 3. <i>Derivas en estructura con columnas recrecidas</i>	28
Tabla 4. <i>Comparativa de desempeño</i>	33
Tabla 5. <i>Comparación de ciclo de vida de las alternativas</i>	34
Tabla 6. <i>Comparación económica</i>	35
Tabla 7. <i>Análisis de costos por alternativa</i>	35
Tabla 8. <i>Comparación integral de técnicas de refuerzo en columnas</i>	36
Tabla 9. <i>Resumen de Lesiones</i>	44
Tabla 10. <i>Parámetros sísmicos y de diseño</i>	48
Tabla 11. <i>Resultados críticos</i>	50
Tabla 12. <i>Irregularidades estructurales</i>	50
Tabla 13. <i>Resultados del modelo estructural</i>	51
Tabla 14. <i>Principales deficiencias estructurales</i>	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Encamisado en columnas	11
Figura 2. Metodología de investigación	17
Figura 3. Proyecto Star Home	18
Figura 4. Toma de esclerometrías en la viga en voladizo entre ejes A y B en el piso 2 y la viga E entre ejes 1-2 en el piso 1	19
Figura 5. Extracción de núcleos columna C1 en el nivel -2.65	20
Figura 6. Escáner de elementos viga 2 ejes B y E piso 2	20
Figura 7. Metodología de análisis de vulnerabilidad sísmica	24
Figura 8. Esquemas de columnas recrecidas	26
Figura 9. Comparación de diagramas de interacción (Columna original vs. Recrecida)	27
Figura 10. Derivas de piso de estructura con columnas recrecidas	27
Figura 11. Diagrama de interacción de columna crítica	28
Figura 12. Curva de interacción con el empresillado metálico para columnas $D=50\text{ cm}$	29
Figura 13. Curva de interacción con el empresillado metálico para columnas 30×50	29
Figura 14. Diagrama de interacción sección compuesta con empresillado metálico	30
Figura 15. Ficha de ubicación de lesiones nivel -2	41
Figura 16. Ficha de ubicación de lesiones nivel -1	42
Figura 17. Ficha de ubicación de lesiones nivel 1	43
Figura 18. Ficha de análisis de lesión columna de sótano	44
Figura 19. Resultados de núcleos de concreto	46
Figura 20. Resultados de esclerometría	46
Figura 21. Resultados de escáner	47
Figura 22. Modelo Sap2000 análisis de vulnerabilidad sísmica	48
Figura 23. Curva interacción columnas $D=0.50\text{ m}$	49
Figura 24. Curva interacción columnas $30\text{ cm} \times 50\text{ cm}$	49
Figura 25. Índices de sobreesfuerzo en columnas	49

GLOSARIO

Empresillado metálico: Técnica de refuerzo estructural que consiste en envolver columnas de concreto con perfiles o placas de acero, proporcionando confinamiento pasivo que mejora la resistencia, rigidez y ductilidad.

Encamisado en concreto: Método de refuerzo que implica adicionar una nueva capa de concreto reforzado alrededor de la sección existente de una columna, incrementando su capacidad a flexo-compresión y rigidez.

Patologías estructurales: Deficiencias o daños en elementos estructurales que comprometen su capacidad para resistir cargas gravitacionales o sísmicas.

Vulnerabilidad sísmica: Grado de susceptibilidad de una estructura a sufrir daños o colapso ante eventos sísmicos, evaluado mediante análisis de rigidez, capacidad de disipación de energía y cumplimiento normativo.

Derivas: Desplazamientos relativos entre pisos de una estructura bajo cargas laterales, medidos como porcentaje de la altura entre pisos. En la NSR-10, se limita a 1% para evitar daños no estructurales.

Capacidad a flexo-compresión: Resistencia de una columna a combinar de cargas axiales (compresión) y momentos flectores, evaluada mediante diagramas de interacción P-M.

Criterio de columna fuerte-viga débil: Principio de diseño sismorresistente que busca que las columnas sean más resistentes que las vigas en los nudos, forzando la formación de rótulas plásticas en vigas en lugar de columnas para evitar colapsos progresivos.

NSR-10: Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente que establece requisitos para el diseño, construcción y reforzamiento de estructuras en Colombia, con énfasis en la seguridad sísmica.

Modelación computacional: Simulación numérica de estructuras mediante software para evaluar su comportamiento bajo cargas gravitacionales y sísmicas, basándose en propiedades de materiales y geometría.

Resistencia a compresión: Capacidad de un material para soportar cargas axiales de compresión, medida en MPa. La NSR-10 exige un mínimo de 17 MPa para concretos estructurales.

INTRODUCCIÓN

En Colombia, las edificaciones existentes de concreto armado de mediana altura, especialmente en entornos urbanos, enfrentan desafíos estructurales comunes: columnas con bajas resistencias a compresión, fisuras por flexión/corte y problemas de durabilidad (hormigueros, exposición de refuerzo). Estas patologías comprometen la seguridad sísmica, ya que las columnas son elementos clave para la estabilidad global y la disipación de energía en eventos sísmicos.

Entre las técnicas de refuerzo más utilizadas se encuentran el empresillado metálico y el encamisado en concreto. Ambas son accesibles en el mercado, tienen costos relativos y cuentan con experiencia acumulada en el medio. Sin embargo, su selección suele basarse en criterios empíricos, sin una evaluación técnica rigurosa que compare su eficacia frente a condiciones locales de carga, amenaza sísmica y durabilidad.

El proyecto Star Home (Medellín), una edificación de dos sótanos y dos niveles, presenta lesiones estructurales críticas: columnas con resistencias <17 MPa, fisuras en vigas/losas, vibraciones en voladizos e inconsistencias constructivas. Un análisis de vulnerabilidad sísmica confirma que la estructura supera el índice de flexibilidad normativo, tiene un coeficiente de disipación reducido ($R=2.40$) y no cumple el criterio "columna fuerte-viga débil", lo que justifica la necesidad de refuerzo.

Este estudio busca evaluar comparativamente el desempeño del empresillado metálico y el encamisado en concreto como técnicas de refuerzo en columnas del proyecto Star Home. A través de modelación numérica y análisis de constructibilidad, durabilidad y costos, se espera establecer criterios técnicos para seleccionar la alternativa más robusta, validando la hipótesis de que un análisis estructural comparativo permitirá definir criterios de selección adecuados para intervenciones en columnas con patologías.

FORMULACION DEL PROBLEMA

PROBLEMA INVESTIGACIÓN

En Colombia, muchas edificaciones de concreto armado de mediana altura presentan columnas con resistencias inferiores a 17 MPa, fisuras y problemas de durabilidad. Entre las técnicas utilizadas para su refuerzo, el empresillado metálico y el encamisado en concreto son comunes por su disponibilidad, costo y experiencia.

Sin embargo, su selección suele basarse en criterios empíricos, sin una evaluación técnica que compare su eficacia en condiciones locales. Aunque hay soluciones como los polímeros reforzados con fibra (FRP), su uso es limitado en concretos con resistencia <17 MPa. La falta de estudios comparativos bajo cargas locales y amenaza sísmica dificulta decisiones fundamentadas, pudiendo generar intervenciones costosas o ineficaces.

PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

¿Qué criterios de comparación permitirán identificar cuál de las dos técnicas de refuerzo estructural, el empresillado metálico o el encamisado en concreto, proporciona un mejor desempeño en términos de resistencia, ductilidad y durabilidad en edificaciones con patologías estructurales como las identificadas en el proyecto Star Home?

HIPOTESIS

Un análisis estructural comparativo entre el empresillado metálico y el encamisado en concreto permitirá establecer criterios técnicos de selección adecuados para intervenciones en columnas de concreto armado con patologías estructurales, considerando las condiciones específicas del contexto colombiano.

DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El estudio se limita a columnas de concreto armado en edificaciones de 2 a 5 pisos en zonas de amenaza sísmica intermedia (Medellín), con resistencias a compresión inferiores a 17 MPa y fisuras por flexión/corte. Se evalúan exclusivamente las técnicas de empresillado metálico y encamisado en concreto.

El análisis se basa en modelación computacional y resultados de ensayos de laboratorio del proyecto Star Home, sin validación experimental a escala real.

JUSTIFICACIÓN

Este estudio se enfoca en edificaciones de concreto armado de mediana altura con patologías estructurales, usando el proyecto Star Home en Medellín como caso de análisis.

En Star Home se identificaron lesiones de durabilidad (hormigueros, eflorescencias, exposición del refuerzo, humedad) y mecánicas (fisuras en vigas/losas, vibraciones en voladizos, modificaciones no documentadas). Los análisis de laboratorio mostraron columnas con resistencias a compresión inferiores a los valores mínimos de la NSR-10, comprometiendo la seguridad estructural.

El estudio evaluará el impacto de las técnicas de encamisado en concreto y empresillado metálico en las columnas afectadas. Se busca:

- Justificar técnicamente el uso de ambos sistemas.
- Evaluar su impacto estructural para mejorar la estabilidad del edificio.
- Proporcionar lineamientos comparativos para intervenciones similares en entornos urbanos colombianos.

Esto contribuye a decisiones más informadas, seguras y eficientes en el refuerzo estructural.

OBJETIVOS

GENERAL

Formular criterios para la comparación de la efectividad de los métodos de refuerzo estructural por empresillado metálico y encamisado en concreto, considerando su impacto en la resistencia, ductilidad y desempeño estructural de columnas en edificaciones afectadas por patologías estructurales.

ESPECIFICOS

- Caracterizar las patologías estructurales presentes en las columnas del proyecto Star Home a partir de inspecciones, ensayos de campo y análisis de laboratorio.
- Modelar y simular el comportamiento estructural de columnas intervenidas con empresillado metálico y encamisado en concreto, bajo condiciones de carga representativas del proyecto Star Home.

- Comparar cuantitativamente el desempeño del empresillado metálico y el encamisado en concreto frente a cargas sísmicas, considerando las condiciones propias de amenaza sísmica en Colombia.
- Evaluar la durabilidad, los costos, el tiempo de ejecución y la viabilidad constructiva del empresillado metálico y del encamisado en concreto, en el contexto ambiental, económico y operativo característico de Colombia.
- Formular recomendaciones técnicas para la aplicación de técnicas de refuerzo en edificaciones similares en Colombia, sustentadas en los resultados del análisis comparativo.

MARCO TEORICO

Este capítulo presenta una revisión del marco teórico sobre las técnicas de refuerzo estructural en columnas, las patologías más comunes que afectan a estas estructuras y las normativas internacionales que guían la selección de métodos de refuerzo. El objetivo es proporcionar una base conceptual robusta para comprender las ventajas, desventajas y criterios de aplicación de cada técnica, con un enfoque particular en el contexto de edificaciones de concreto armado como las existentes en Colombia.

TÉCNICAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL EN COLUMNAS

El refuerzo de columnas en estructuras de concreto armado constituye una de las principales estrategias de rehabilitación estructural, dado que la falla de estos elementos compromete de manera crítica la estabilidad global del sistema. Su desempeño ante cargas gravitacionales y sísmicas depende de factores como la capacidad a compresión, la ductilidad y la resistencia a cortante, los cuales pueden ser mejorados mediante técnicas de encamisado en concreto o empresillado metálico (Ghobarah & Said, 2001).

ENCAMISADO EN CONCRETO (CONCRETE JACKETING)

El encamisado en concreto consiste en adicionar una nueva capa de concreto reforzado alrededor de la sección existente. Este procedimiento incrementa la sección transversal, añade refuerzo longitudinal y transversal, y mejora simultáneamente la resistencia a flexo-compresión, rigidez y ductilidad. Adicionalmente, permite reparar zonas deterioradas y proporcionar una nueva barrera protectora contra agentes de durabilidad (Torres & López, 2015).

Limitaciones: Este método es altamente invasivo, requiere mayores tiempos de obra y puede generar incrementos de masa y rigidez que alteren la respuesta sísmica global, produciendo efectos torsionales no deseados o mayores exigencias sobre la cimentación (Bernal & Yamín, 2011).

Figura 1. Encamisado en columnas



Fuente: (Antoniou, 2023).

Mecanismo de Acción: Actúa aumentando la sección geométrica y añadiendo refuerzo. El nuevo concreto y el acero longitudinal incrementan directamente la capacidad a flexo-compresión (diagrama de interacción P-M). El refuerzo transversal (estribos) confina el núcleo de concreto, aumentando su resistencia a compresión y, de manera crucial, su capacidad de deformación (ductilidad). Asimismo, este refuerzo transversal incrementa significativamente la resistencia a cortante del elemento. La efectividad depende de una adecuada transferencia de esfuerzos en la interfaz viejo-nuevo, lograda mediante escarificación y conectores. (Saidi, Putra, Amalia, & Munawir, 2023)

Ventajas:

- **Solución Integral:** Mejora simultáneamente resistencia, rigidez y ductilidad.
- **Reparación y Protección:** Permite restaurar secciones de concreto deterioradas, proporcionando una nueva barrera protectora duradera.

Desventajas:

- **Invasividad y Costo:** Es un método altamente invasivo, que requiere demoliciones significativas y altos costos de reparación.
- **Incremento de Masa y Rigidez:** El aumento de peso y rigidez modifica la respuesta dinámica global de la estructura, lo que debe ser evaluado para no generar efectos torsionales adversos o sobrecargar la cimentación.

EMPRESILLADO METÁLICO (STEEL JACKETING)

El empresillado metálico se basa en el confinamiento pasivo del núcleo de concreto mediante placas y perfiles de acero. Bajo carga axial, el encamisado restringe la expansión lateral del concreto, generando un estado de esfuerzos triaxial que aumenta resistencia y ductilidad. Es particularmente eficaz para mejorar el comportamiento a cortante y ductilidad de empalmes deficientes (Villar-Salinas, Guzmán, & Carrillo, 2021).

Limitaciones: Su durabilidad depende de la protección contra corrosión, y su contribución a la resistencia a flexión es limitada en comparación con el encamisado en concreto (Waenpracha & Pannachet, 2024).

Mecanismo de Acción: Proporciona un confinamiento pasivo al núcleo de concreto. Bajo compresión y deformación lateral, el concreto tiende a expandirse; el encamisado de acero restringe esta expansión, generando un estado de esfuerzos triaxial que aumenta la resistencia

y ductilidad del concreto. Las planchas transversales actúan como un refuerzo a cortante externo.

Ventajas:

- Alta Ductilidad: Es extremadamente eficaz para mejorar el comportamiento dúctil y la capacidad de zonas de empalmes deficientes.
- Incremento de Resistencia a Cortante: Proporciona un aumento significativo de la resistencia a cortante.

Desventajas:

- Durabilidad: Susceptible a la corrosión si no se protege adecuadamente (Ghobarah & Said, 2001).
- Flexión: Su contribución a la capacidad a flexión es limitada. En la actualidad, ha sido en gran parte superado por técnicas con FRP por su relación costo-beneficio.

TÉCNICAS DE REFUERZO ESTRUCTURAL EN COLUMNAS

La selección de una técnica de refuerzo debe ser una respuesta directa al diagnóstico patológico. Cada lesión compromete el desempeño de la columna de una manera específica, lo que condiciona el método de intervención más eficaz (Waenpracha & Pannachet, 2024)

Diagnóstico: Deficiencia de Capacidad a Cortante y Confinamiento

- Patología: Es la deficiencia más crítica en estructuras de concreto diseñadas con códigos antiguos. Se manifiesta en estribos de pequeño diámetro, espaciamiento excesivo y anclajes a 90°. Esta condición conduce a una falla frágil por cortante, que ocurre antes de que el elemento pueda desarrollar su capacidad dúctil a flexión. (Fan, Liguí Yang, Yuyin Wang, & et al, 2025)
- Criterio de Intervención: El objetivo es aplicar los principios de Diseño por Capacidad para garantizar que la resistencia a cortante del elemento reforzado sea superior a la demanda de cortante generada cuando la columna alcanza su máxima capacidad a flexión probable. Se busca forzar una falla dúctil y predecible.
- Selección de Técnica: Tanto el empresillado metálico como el encamisado en concreto son eficaces para aumentar la resistencia a cortante. La elección dependerá de si también se requiere un aumento de la capacidad a flexión, en cuyo caso el encamisado es superior. (Waenpracha & Pannachet, 2024)

Diagnóstico: Deficiencia de Resistencia a Flexo-Compresión

- Patología: La columna carece de suficiente refuerzo longitudinal o la resistencia del concreto (f'_c) es muy baja. (Fan, Liguí Yang, Yuyin Wang, & et al, 2025)
- Criterio de Intervención: Se debe incrementar la capacidad del diagrama de interacción P-M de la sección.
- Selección de Técnica: El encamisado en concreto es la solución más directa y efectiva al añadir área de concreto y acero longitudinal.

Diagnóstico: Patologías de Durabilidad (Corrosión, etc.)

- Patología: Agentes externos han degradado el concreto y/o el acero de refuerzo.
- Criterio de Intervención: La intervención debe reparar el daño y proteger el elemento.

- Selección de Técnica: El encamisado en concreto es la solución más integral al restituir la sección y proporcionar una nueva barrera de recubrimiento duradero. (Ironni Sococol, Dăescu, & Moșoarcă, 2022)

NORMATIVAS INTERNACIONALES PARA EL REFUERZO ESTRUCTURAL

La práctica de la rehabilitación estructural está guiada por normativas avanzadas que han evolucionado hacia metodologías basadas en el desempeño. Para el contexto colombiano, donde la NSR-10 establece los requisitos generales, es indispensable recurrir a estándares como el ASCE 41-17.

FUNDAMENTOS DE LA EVALUACIÓN BASADA EN EL DESEMPEÑO

El diseño y evaluación basada en el desempeño (Performance-Based Design/Evaluation) busca alcanzar objetivos de desempeño explícitos, definidos como la combinación de un Nivel de Desempeño Estructural (el estado de daño aceptable) y un Nivel de Amenaza Sísmica. Este enfoque permite una ingeniería más racional, donde el nivel de seguridad puede ser explícitamente seleccionado en función de la importancia del edificio y la viabilidad del refuerzo ((FEMA), 2000).

PRINCIPIOS DE DISEÑO POR CAPACIDAD EN LA REHABILITACIÓN

El Diseño por Capacidad (Capacity Design) es el pilar de la ingeniería sismorresistente moderna. Su objetivo es controlar el modo de falla de la estructura, diseñando una jerarquía de resistencias donde los mecanismos de falla dúctiles y predecibles (como la fluencia por flexión en rótulas plásticas) ocurran antes que los mecanismos frágiles (como la falla por cortante) (Scala & Colleagues., 2024).

En la evaluación de una columna existente, esto implica:

- Calcular su capacidad a flexión esperada o probable, M_{pr} , que considera la sobrerresistencia real de los materiales.
- Determinar la demanda de cortante asociada, V_d , que es el cortante que se generaría en la columna cuando sus extremos alcanzan M_{pr} . (Issa, 2021)
- Verificar que la capacidad a cortante nominal, V_n , sea mayor que la demanda V_d . La condición de seguridad es: $\phi V_n > V_d$.

Si esta condición no se cumple, la columna es controlada por cortante y sujeta a una falla frágil. La intervención de refuerzo (sea encamisado o empresillado) debe enfocarse en aumentar ϕV_n hasta satisfacer este criterio.

COMPARATIVA APLICADA DE CRITERIOS NORMATIVOS

En el ámbito internacional, normativas como la ASCE 41-17 y el Eurocódigo 8 Parte 3 proveen lineamientos detallados para la evaluación y rehabilitación sísmica de estructuras existentes. Sin embargo, en Colombia, el marco regulatorio lo constituye la NSR-10 (2010) y la Guía Técnica para la Evaluación y Reforzamiento de Estructuras Existentes (MinVivienda, 2020). Estas establecen requisitos mínimos para edificaciones existentes y reconocen la importancia de aplicar metodologías basadas en el desempeño para garantizar intervenciones seguras y eficientes. A diferencia de los estándares internacionales, la NSR-10 incorpora factores de seguridad ajustados al contexto colombiano, considerando particularidades de amenaza sísmica, calidad constructiva y disponibilidad de materiales locales. Por ello, la

selección de la técnica de refuerzo no solo depende de parámetros estructurales, sino también de criterios de viabilidad constructiva y económica en entornos urbanos del país (Bernal & Yamín, 2011).

Tabla 1. Comparativa de requerimientos normativos

Característica	ASCE 41-17 (Enfoque EE. UU.)	Eurocódigo 8, Parte 3 (Enfoque Europeo)
Filosofía de Seguridad	Se basa en factores de conocimiento (κ) que reducen la capacidad calculada. La incertidumbre penaliza la resistencia del elemento.	Se basa en Factores de Confianza (CF) que aumentan la demanda. La incertidumbre penaliza las acciones de diseño.
Análisis de Ductilidad	A nivel de componente. Usa factores "m" para análisis lineal y límites de rotación plástica (θ_p) explícitos para análisis no lineal.	A nivel de sistema. Utiliza un factor de comportamiento "q" global y bajo ($q=1.5$ por defecto).
Criterios de Aceptación	Proporciona tablas detalladas de criterios de aceptación para diferentes tipos de elementos y acciones.	Proporciona fórmulas para calcular la capacidad (ej. rotación de la cuerda).
Materiales	Distingue explícitamente entre resistencia esperada (para capacidad dúctil) y de límite inferior (para capacidad frágil), lo cual es coherente con el diseño por capacidad.	Utiliza la resistencia media de los materiales, pero la ajusta con factores de seguridad parciales (γ_m) y el Factor de Confianza (CF).

En conclusión, el marco normativo internacional provee las herramientas para una evaluación rigurosa y un diseño de refuerzo fundamentado. La NSR-10 establece el contexto legal en Colombia, pero la referencia a estándares como el ASCE 41-17 y a los principios fundamentales del diseño por capacidad es esencial para aplicar metodologías de análisis avanzadas y criterios de aceptación detallados, permitiendo una intervención segura y optimizada.

La revisión teórica presentada constituye la base para el análisis comparativo aplicado al proyecto Star Home. Los resultados de modelación de columnas reforzadas mediante encamisado en concreto y empresillado metálico se contrastarán con los criterios técnicos y normativos identificados en esta sección, permitiendo establecer lineamientos de intervención ajustados al contexto colombiano.

ESTADO DEL ARTE

El reforzamiento estructural mediante técnicas de encamisado en concreto y empresillado metálico ha sido ampliamente empleado como estrategia para la recuperación de capacidad portante en columnas afectadas por deficiencias de diseño, cambio de uso, deterioro o incremento de cargas sísmicas. En Colombia, estas técnicas han sido aplicadas tanto en

edificaciones institucionales como educativas, principalmente en intervenciones posteriores al reforzamiento sísmico exigido por la NSR-10.

Uno de los casos más documentados es el reforzamiento de la Torre B de la sede central del Instituto Nacional de Medicina Legal en Bogotá, donde se implementó el encamisado en concreto como medida de aumento de resistencia axial y confinamiento, dentro de un proceso de modernización de las instalaciones (Instituto Nacional de Medicina Legal, 2018). En este caso, la técnica fue seleccionada por su compatibilidad con la estructura existente y su contribución al mejoramiento del desempeño sísmico.

De manera similar, el programa de reforzamiento estructural adelantado por Findeter en las sedes del SENA en Girón, Santander, incluyó especificaciones técnicas de encamisado en concreto para columnas críticas, conforme a las exigencias del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (Findeter, 2021). El documento técnico evidencia que esta técnica fue preferida sobre alternativas metálicas por razones de durabilidad y rigidez final del sistema.

En contraste, otros proyectos nacionales han optado por sistemas metálicos. Tal es el caso del reforzamiento ejecutado por Concremex en Moniquirá, donde se implementó empresillado metálico para aumentar la capacidad axial de columnas sin modificar significativamente su geometría. Una solución combinada fue aplicada en el Colegio Unidad Pedagógica en Bogotá, donde se utilizaron anillos metálicos y encamisado parcial de concreto con el fin de mejorar tanto la resistencia como el confinamiento del refuerzo longitudinal.

A nivel internacional, existen experiencias de mayor alcance documental, especialmente en infraestructura de transporte. En la Ciudad de México se desarrolló un programa de reforzamiento de columnas mediante encamisado en concreto en estructuras públicas tras los sismos del 2017, priorizando la reparación de elementos con alta demanda sísmica (Gobierno de la Ciudad de México, 2019). En Turquía, el uso de encamisado se ha documentado ampliamente en estructuras afectadas por el sismo de Kocaeli de 1999, destacando su efectividad en edificios de concreto con diseño deficiente (Sezen & Moehle, 2004). Japón, por su parte, ha aplicado el empresillado metálico de manera sistemática en puentes desde la década de 1990 como medida de reforzamiento rápido y económico (Japan Road Association, 2002). Finalmente, en Estados Unidos, el empresillado ha sido empleado extensivamente en columnas de puentes de California tras el sismo de Northridge, registrándose incrementos significativos en la ductilidad y capacidad de confinamiento (Priestley et al., 1996).

Al analizar los casos revisados, se evidencia que el encamisado en concreto es preferido cuando se requiere aumentar la rigidez y la resistencia axial, mientras que el empresillado metálico se usa cuando la intervención busca rapidez constructiva, mínima alteración geométrica o cuando el concreto de recubrimiento existente presenta baja adherencia. Sin embargo, la mayoría de los documentos revisados carecen de información detallada sobre desempeño post-intervención, control de calidad o evaluación a largo plazo, lo que constituye una brecha técnica que esta investigación busca abordar.

METODOLOGÍA

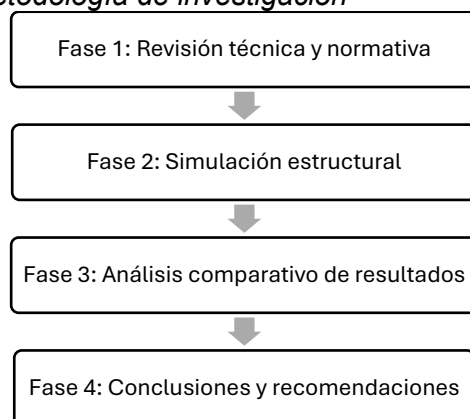
La investigación adopta un enfoque **cuantitativo, comparativo y analítico** para evaluar el comportamiento estructural de dos técnicas de refuerzo en columnas de concreto: empresillado metálico y encamisado en concreto armado. El estudio se basa exclusivamente en simulaciones computacionales en ETABS 21, apoyadas en datos reales del proyecto Star Home, sin realizar ensayos físicos a escala real.

- Limitaciones prácticas: la ejecución de ensayos experimentales requiere costos, tiempo y recursos que exceden el alcance de esta investigación académica.
- Enfoque aplicado al caso de estudio: los resultados de ensayos destructivos y no destructivos previamente realizados en el proyecto Star Home proporcionaron parámetros confiables de resistencia y propiedades de los materiales, suficientes para alimentar los modelos computacionales.
- Soporte normativo: la NSR-10 (2010) y la ASCE 41-17 reconocen el uso de herramientas de análisis estructural avanzado como una alternativa válida de evaluación y prediseño de técnicas de reforzamiento.

La metodología de investigación se estructura en cuatro fases secuenciales, integrando análisis normativo, modelación numérica y evaluación comparativa de desempeño:

- Fase :1 Revisión técnica y normativa: Se efectuará una revisión exhaustiva de literatura científica, reportes técnicos y normativas internacionales y nacionales vigentes (ACI 318-19, ASCE 41-17, NSR-10, Eurocódigo 8, entre otras). El objetivo es identificar los parámetros estructurales y de durabilidad que condicionan la efectividad de las técnicas de refuerzo en columnas. Los hallazgos se sintetizarán en una matriz comparativa preliminar, evaluando variables clave: resistencia a compresión, ductilidad, rigidez, facilidad constructiva, tiempo de intervención, costo, impacto arquitectónico y requerimientos de mantenimiento.
- Fase 2: Modelación estructural computacional: Se desarrollarán modelos numéricos en ETABS 21 representativos de las columnas del proyecto Star Home, incorporando geometría, propiedades de materiales y resultados de ensayos de núcleos y esclerometría. Los elementos estructurales se representarán mediante miembros tipo *frame*, sometidos a combinaciones de cargas gravitacionales y acciones sísmicas de amenaza intermedia, según zonificación de la NSR-10 para Medellín. El análisis seguirá los criterios de evaluación basada en desempeño de la ASCE 41-17, verificando derivas, capacidad axial y modos de falla.
- Fase 3: Análisis comparativo de resultados: Se procesarán los resultados para cuantificar la mejora en capacidad axial, rigidez lateral, ductilidad y control de derivas aportada por cada técnica. Se establecerán comparaciones frente a los umbrales normativos y a los criterios definidos en la matriz de Fase 1. Adicionalmente, se realizará un análisis cualitativo de factibilidad constructiva y económica para priorizar soluciones aplicables en el contexto colombiano.
- Fase 4: Síntesis de conclusiones y formulación de recomendaciones: Con base en la evidencia numérica y comparativa, se generarán lineamientos técnicos para la selección de técnicas de refuerzo en columnas de concreto armado, priorizando cumplimiento normativo, eficiencia estructural, durabilidad y viabilidad de implementación en proyectos de rehabilitación urbana.

Figura 2. Metodología de investigación



MARGEN DE ERROR Y SENSIBILIDAD

El modelo estructural considera las propiedades obtenidas en laboratorio y campo; sin embargo, se reconoce un margen de error de $\pm 10\%$ respecto a los valores normativos de resistencia a compresión (f_c) y módulo de elasticidad (E_c). Este rango se adopta como aceptable en función de la variabilidad propia de materiales en estructuras existentes. Adicionalmente, se efectuó un análisis de **sensibilidad** modificando los parámetros mecánicos de los materiales ($\pm 5\%$ y $\pm 10\%$) para verificar la robustez de los resultados y la coherencia del modelo frente a variaciones en los datos de entrada.

LIMITACIONES METODOLÓGICAS

Entre las limitaciones más relevantes se encuentran:

- Ausencia de validación experimental a escala real, lo que restringe la extrapolación de resultados a todas las condiciones posibles.
- Simplificación de la geometría y detalles constructivos en la modelación (ej. juntas, irregularidades de obra).
- Dependencia directa de la calidad y representatividad de los ensayos de laboratorio y campo realizados en el proyecto *Star Home*.
- El análisis se concentra en cargas gravitacionales y sísmicas principales, sin incluir efectos secundarios como interacción suelo–estructura o degradación por corrosión a largo plazo.

PARÁMETROS DE ENTRADA Y MODELOS

Los parámetros de entrada empleados en la modelación incluyen:

- Concreto columnas: $f_c = 9$ MPa y 21 MPa (según tipo de elemento),
- E_c calculado conforme a NSR-10.
- Acero de refuerzo: $f_y = 420$ MPa, $E_s = 200.000$ MPa.
- Acciones de carga: muertas, vivas, hidrodinámicas y sísmicas, conforme a capítulos B.2, B.5 y A.3 de la NSR-10.
- Coeficientes sísmicos: definidos para la ciudad de Medellín, suelo tipo D, amenaza intermedia.

RESULTADOS

El proyecto Star Home es una edificación residencial compuesta por dos sótanos, dos niveles y dos cubiertas inclinadas. Se encuentra en una zona de amenaza sísmica intermedia y su estructura está compuesta principalmente por pórticos de concreto reforzado y losas aligeradas. La cimentación está conformada por pilas de 1 metro de diámetro y 4 metros de profundidad.

Durante el proceso de inspección y diagnóstico, se evidenciaron deficiencias estructurales tales como fisuración en vigas y losas, exposición del refuerzo, humedad, eflorescencias, hormigueros y un desempeño sísmico inadecuado

SISTEMA ESTRUCTURAL

El sistema estructural está basado en pórticos de concreto reforzado, columnas circulares de 50 cm y rectangulares de 30x50 cm. Las vigas de 30x40 cm y los nervios de 10x40 cm conforman el marco estructural. Losas aligeradas de 5 cm de espesor y placas de cubierta macizas de 10 cm de espesor.

Figura 3. Proyecto Star Home



REVISIÓN DE ANTECEDENTES Y NORMATIVAS APLICABLES

ESTUDIOS REALIZADOS

Se realizaron estudios de Patología, Vulnerabilidad Sísmica y Reforzamiento Estructural, donde se identificaron deficiencias en la resistencia a compresión del concreto, fisuras en vigas y losas, y problemas de configuración estructural que afectan el comportamiento sísmico de la edificación

NORMATIVA APLICABLE

El análisis y las propuestas de intervención se basan en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), específicamente en los capítulos relacionados con estructuras existentes y reforzamientos.

HISTORIA CLÍNICA (LESIONES Y DAÑOS IDENTIFICADOS)

La identificación de las principales lesiones encontradas se organiza en las fichas de ubicación presentadas como anexos, a continuación, se describen algunas y se presenta el modelo:

- Lesiones Mecánicas:
- Fisuración por flexión y corte en vigas y losas.
- Vibraciones excesivas en voladizos.
- Lesiones de Durabilidad:
- Hormigueros y exposición del refuerzo.
- Humedad, eflorescencias y desmoronamiento del concreto.

Para cada uno de estos daños, presenta las fichas de inspección y el registro fotográfico correspondientes en el Anexo 1 de este documento.

ENSAYOS REALIZADOS

Las exploraciones se llevaron a cabo en coordinación con el personal del laboratorio y bajo las siguientes consideraciones:

- Ubicación del equipo: Priorizando accesibilidad y condiciones seguras.
- Condiciones de los elementos: Verificando posibles limitaciones debido a saturación o deterioro del concreto.

ENSAYOS DE ESCLEROMETRÍA.

El ensayo de esclerometría mide la dureza superficial del concreto mediante un martillo de resorte calibrado, y sus resultados se correlacionan cuantitativamente con la resistencia a compresión de núcleos destructivos. Esta correlación permite validar mediciones no destructivas, estimar la resistencia in situ y evaluar la homogeneidad del material. Al disponer de los datos de laboratorio reales, se puede determinar con mayor precisión la capacidad resistente de los elementos inspeccionados. (Badarloo & Lehner, 2023)

Figura 4. Toma de esclerometrías en la viga en voladizo entre ejes A y B en el piso 2 y la viga E entre ejes 1-2 en el piso 1



Se llevaron a cabo 16 mediciones de resistencia superficial en diferentes elementos estructurales, específicamente en la viga diagonal entre ejes 1-4 en el piso 2; la viga en voladizo entre ejes A y B en el piso 2; la columna 3A en el piso 2; la columna 2A en el piso 1; la columna B4 en el piso 2; la columna C1 en el nivel -2.65; la columna E1 en el nivel -2.65; la columna F4 en el nivel -4.45 (cimentación de la piscina); la viga E entre ejes 2-3 en el nivel -

2.65 (piscina); la viga C entre ejes 1-2 en el piso 1; la viga B entre ejes 2-3 en el piso 1; la viga 2 entre ejes E y F; la viga F entre ejes 1-2 en el piso 2, y la viga F1 entre ejes 2-3 en el piso 2.

TOMA DE NUCLEOS DE CONCRETO.

La extracción de núcleos de concreto es un procedimiento utilizado para evaluar las propiedades mecánicas, físicas o químicas del concreto endurecido en estructuras ya construidas, ya que permite obtener muestras cilíndricas directamente de elementos estructurales como columnas, vigas, losas o muros, sin necesidad de demoler ni alterar de manera significativa la edificación. En este caso, se extrajeron 12 núcleos en los siguientes puntos: columna F4 en el nivel -4.45 (cimentación de piscina), columna C1 en el nivel -2.65, viga E entre ejes 2-3 en la losa de piscina, columna 2A en el piso 1, columna 3A en el piso 2, columna B4 en el piso 2, columna E1 en el piso 2, columna E1 en el nivel -2.65, viga 2 entre ejes C-E en el piso 1, viga B entre ejes 3-4 en el piso 2, nervio en la zona de voladizo (punta) en el piso 2 y pila E1.

Figura 5. Extracción de núcleos columna C1 en el nivel -2.65



ESCANEO DE REFUERZOS.

Se realizó escáner en todos los elementos que fueron intervenidos con extracción de núcleos y en la Viga 2 entre ejes B y E para verificar la ubicación y la integridad de los refuerzos de acero.

Figura 6. Escáner de elementos viga 2 ejes B y E piso 2



ANALISIS DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE LABORATORIO

Los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio se presentan en el Anexo 2 de este documento, dichos resultados muestran que varios elementos estructurales, específicamente columnas, presentan resistencias a la compresión que no cumplen con los criterios establecidos por la NSR-10.

Resistencia mínima del concreto estructural: Según el Capítulo C.5 de la NSR-10, ningún elemento estructural puede tener una resistencia a la compresión inferior a 17 MPa. Criterios de aceptación de núcleos: El promedio de tres núcleos extraídos debe ser al menos el 85% de la resistencia especificada (f_c). Además, ningún núcleo individual debe tener una resistencia menor al 75% de f_c .

IMPLICACIONES DEL INCUMPLIMIENTO DE LA RESISTENCIA

El incumplimiento de estos valores implica un riesgo significativo para la capacidad estructural de la edificación. En particular, las columnas que presentan valores por debajo del 85% de la resistencia especificada deben considerarse críticas, ya que las fallas en estos elementos pueden derivar en mecanismos de colapso progresivo, especialmente en condiciones sísmicas.

IMPACTO EN EL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

Las columnas son elementos fundamentales para la disipación de energía y la transferencia de cargas verticales hacia la cimentación. Cuando las resistencias medidas mediante ensayos de núcleos de concreto caen por debajo del 85% de la resistencia especificada (f_c), la capacidad de carga axial y la resistencia a momentos flectores de estos elementos se ve comprometida.

En condiciones normales, las columnas deben ser suficientemente robustas para asegurar la integridad de la estructura bajo cargas estáticas. Sin embargo, en zonas de amenaza sísmica, estas deficiencias se agravan, ya que:

Las cargas laterales inducidas por sismos provocan esfuerzos adicionales que superan los niveles de carga gravitacional estática.

Las columnas con resistencias inferiores no solo fallan más rápido bajo carga sísmica, sino que pueden desencadenar colapsos progresivos. Esto ocurre cuando la falla de una columna provoca una redistribución de cargas hacia otras columnas, que a su vez pueden no estar diseñadas para soportar el exceso de carga, generando un efecto dominó.

CUMPLIMIENTO DEL CRITERIO DE "COLUMNA FUERTE-VIGA DÉBIL"

El Capítulo C.21.3.6 de la NSR-10 establece que las columnas deben ser más resistentes que las vigas en los nudos estructurales para garantizar un adecuado mecanismo de disipación de energía. Este principio, conocido como el criterio de "columna fuerte-viga débil", busca que, en caso de una sobrecarga, las vigas cedan antes que las columnas, evitando así el colapso total de la estructura.

Cuando este criterio no se cumple, como ocurre en los casos donde las columnas presentan resistencias reducidas:

Riesgo de fluencia por flexión en columnas: La flexión excesiva en las columnas puede llevarlas rápidamente a su punto de falla. Dado que las columnas son elementos verticales clave, su falla compromete la estabilidad general de la estructura. Desarrollo de mecanismos

plásticos en columnas: En un evento sísmico, las columnas podrían formar articulaciones plásticas, lo cual no es deseable, ya que compromete la capacidad de la edificación para absorber la energía sísmica sin colapsar.

PÉRDIDA DE RIGIDEZ ESTRUCTURAL Y CAPACIDAD SÍSMICA

La rigidez estructural es un parámetro esencial para garantizar que una edificación pueda resistir los desplazamientos laterales inducidos por eventos sísmicos. La reducción de la resistencia en las columnas implica una disminución proporcional en la rigidez de la estructura, lo que puede generar:

Incremento en las derivas inter-piso: Según la NSR-10, Capítulo A.10.2, el desplazamiento relativo entre pisos (deriva) debe mantenerse dentro de límites aceptables para evitar daños tanto estructurales como no estructurales. Columnas debilitadas permiten mayores desplazamientos laterales, excediendo estos límites y aumentando el riesgo de daño o colapso.

Amplificación de esfuerzos en otros elementos: Al disminuir la rigidez de las columnas, otros elementos estructurales como vigas y muros pueden experimentar esfuerzos superiores a los previstos en el diseño original, conduciendo a posibles fallas en cascada.

Resonancia estructural: En sismos, una estructura con baja rigidez puede entrar en resonancia con las frecuencias naturales del terreno, amplificando los desplazamientos y esfuerzos.

El incumplimiento de los valores de resistencia de las columnas detectado en los ensayos

no solo viola los estándares mínimos establecidos en la NSR-10, sino que compromete gravemente la seguridad estructural, especialmente en escenarios sísmicos. La identificación de estos valores insuficientes permite inferir que la estructura no cuenta con la rigidez ni la capacidad de disipación de energía necesarias para resistir un evento sísmico moderado o severo, incrementando significativamente el riesgo de colapso progresivo.

Es imperativo considerar intervenciones estructurales inmediatas que refuercen los elementos deficientes, garantizando la conformidad con la normativa vigente y la seguridad de los ocupantes.

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA

De acuerdo con la visita de inspección del **09 de enero de 2025**, se efectuó el estudio de patología estructural, identificando condiciones que comprometen el desempeño sísmico de la edificación. Los principales hallazgos fueron:

- Baja resistencia del concreto: Ensayos de laboratorio evidenciaron columnas con resistencia a compresión inferior a los valores exigidos por la NSR-10, lo que reduce la capacidad portante y la estabilidad global.
- Fisuración y vibraciones excesivas: Se observaron fisuras en vigas y losas con patrones de flexión y cortante, además de vibraciones notorias en voladizos, indicando insuficiente rigidez en algunos sectores.
- Inconsistencias constructivas: Se detectaron diferencias relevantes entre diseño y construcción, alterando la distribución de esfuerzos y el comportamiento global de la estructura, lo que incrementa el riesgo bajo carga sísmica.

- Lesiones de durabilidad: Presencia de hormigueros, pérdida de recubrimiento, exposición de refuerzo, humedad y eflorescencias, condiciones que favorecen la corrosión y disminuyen la vida útil de los elementos.
- Reducción de rigidez y capacidad de disipación de energía: La combinación de los factores anteriores incrementa la vulnerabilidad frente a colapso progresivo en sismo.

Con base en la clasificación de amenaza sísmica intermedia para Medellín, se ejecutará la evaluación de vulnerabilidad y propuesta de reforzamiento según el Capítulo A.10 de la NSR-10, verificando el cumplimiento del sistema de pórticos en concreto reforzado con $R = 5.0$ (capacidad moderada de disipación de energía).

De acuerdo con la Tabla A.10.4-1 de la NSR-10, la calidad de construcción se clasifica como regular ($f_c = 0.80$) y la calidad de diseño como buena ($f_e = 1.0$). Los parámetros mecánicos de materiales serán definidos por el ingeniero calculista aplicando criterio técnico y experiencia profesional.

Finalmente, se presenta el resumen de valores utilizados para el cálculo de los índices de sobrerresistencia y verificación de desempeño:

- Estado de la construcción-buena $f_c=0.80$
- Calidad de diseño-regular $f_e=1.0$

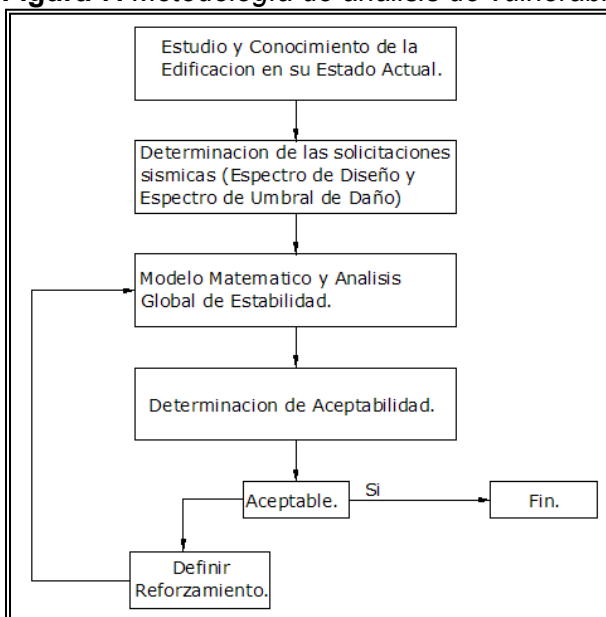
METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

En Colombia, la Ley 400 de 1997 modificada por la Ley 1229 de 2008 y decreto 926 del 19 de marzo de 2010, también denominada Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), para todas las edificaciones construidas en el territorio nacional, se orientan a cumplir el objetivo principal de las construcciones sismo resistentes que se establece en el artículo 1.2.2 Objeto: *"... Una edificación diseñada siguiendo los requisitos de este reglamento, debe ser capaz de resistir además de las fuerzas que le impone el uso, temblores de poca intensidad sin daño, temblores moderados sin daño estructural pero posiblemente con algún daño de los elementos no estructurales, un temblor fuerte con daños a los elementos estructurales y no estructurales, pero sin colapso."*

Los criterios de diseño sismo resistente establecidos en la mayoría de las normas internacionales tienen como objetivo principal la protección de la vida humana. Aunque las normas consideran la posibilidad de daños tanto estructurales como en los elementos no estructurales, no son claras en establecer los criterios de aceptabilidad ni la intensidad de los daños que se pueden permitir. Las estructuras reforzadas de acuerdo con las recomendaciones aquí presentadas deben garantizar el adecuado funcionamiento de la edificación en caso de un sismo de gran magnitud (sismo de diseño), cumpliendo de esta manera con el objetivo de la ley.

La metodología seguida en la ejecución de esta consultoría se resume en el siguiente diagrama:

Figura 7. Metodología de análisis de vulnerabilidad sísmica



Fuente propia basada en NSR-10 (2010)

Con el fin de evaluar la seguridad estructural del proyecto Star Home ante acciones sísmicas, se realizó un estudio de vulnerabilidad de acuerdo con los lineamientos de la NSR-10 (2010). Este análisis comprendió:

- **Avalúo de cargas:** Se determinaron las cargas muertas, vivas, hidrodinámicas y sísmicas conforme a los capítulos B.2, B.5 y A.3 de la NSR-10. El espectro de diseño se definió para la ciudad de Medellín con perfil de suelo tipo D, considerando una amenaza sísmica intermedia.
- **Modelación estructural:** La edificación fue representada en ETABS 21 mediante un sistema de pórticos en concreto reforzado, incluyendo las características geométricas y de materiales obtenidas en los ensayos de campo y laboratorio.
- **Evaluación de desempeño:** Se revisaron derivas, rigidez, índice de flexibilidad, coeficiente de disipación de energía y curvas de interacción de columnas, verificando el cumplimiento de los criterios establecidos por la NSR-10.
- **Resultados principales:**
 - Varias columnas presentan resistencias a compresión inferiores a 17 MPa, incumpliendo los valores mínimos normativos.
 - El índice de flexibilidad máximo ($IF = 2.27$) supera el límite del 1%, lo que evidencia excesiva deformabilidad y vulnerabilidad a derivas sísmicas.
 - El coeficiente de disipación de energía calculado ($R = 2.40$) es inferior al valor teórico esperado para pórticos de concreto reforzado ($R_o = 5.0$), lo que indica una limitada capacidad de absorción de energía.
 - Las revisiones a flexo-compresión y cortante muestran que las columnas actuales no cumplen con la condición de columna fuerte – viga débil, comprometiendo la seguridad estructural.
 - Estos hallazgos permiten concluir que la estructura, en su estado actual, presenta deficiencias críticas que justifican la implementación de técnicas de refuerzo.

El análisis completo, incluyendo los cálculos detallados, tablas de cargas, combinaciones normativas, curvas de interacción y modelos computacionales, se encuentra documentado en el Anexo 3: Estudio de Vulnerabilidad Sísmica.

DISEÑO DE ALTERNATIVAS DE REFUERZO EN COLUMNAS

Posterior al análisis de vulnerabilidad sísmica de la edificación, se desarrolló el diseño de reforzamiento de las columnas, considerando las dos alternativas objeto de estudio: empresillado metálico y recrecimiento en concreto reforzado. En este capítulo se presentan los resultados de diseño obtenidos para cada técnica, incluyendo las verificaciones de capacidad axial, flexo-compresión, rigidez y desempeño sísmico según los criterios de la NSR-10.

Finalmente, se realiza una comparación técnica y analítica entre ambas soluciones, evaluando su eficacia estructural, viabilidad constructiva y relación costo-beneficio, con el fin de establecer lineamientos que orienten la selección de la alternativa de reforzamiento más adecuada para este caso de estudio y para intervenciones similares en edificaciones de concreto armado.

RECRECIMIENTO EN CONCRETO

Para el recrecimiento de las columnas se tuvo en cuenta, como aspecto fundamental para la definición, la practicidad constructiva, priorizada para minimizar las intervenciones estructurales en el edificio durante el reforzamiento.

La Tabla 2 muestra las secciones de columnas existentes y las propuestas (Recrecidas). De manera esquemática se detallan en la Figura 8.

Tabla 2. Secciones de columnas (Original vs. Recrecida)

Columna original	Cuantía de refuerzo longitudinal original	Columna recrecida	Cuantía de refuerzo longitudinal original
30x50	0.60%	50x70	1.12%
40x40	2.36%	60x60	1.49%
50	0.81%	70	1.14%

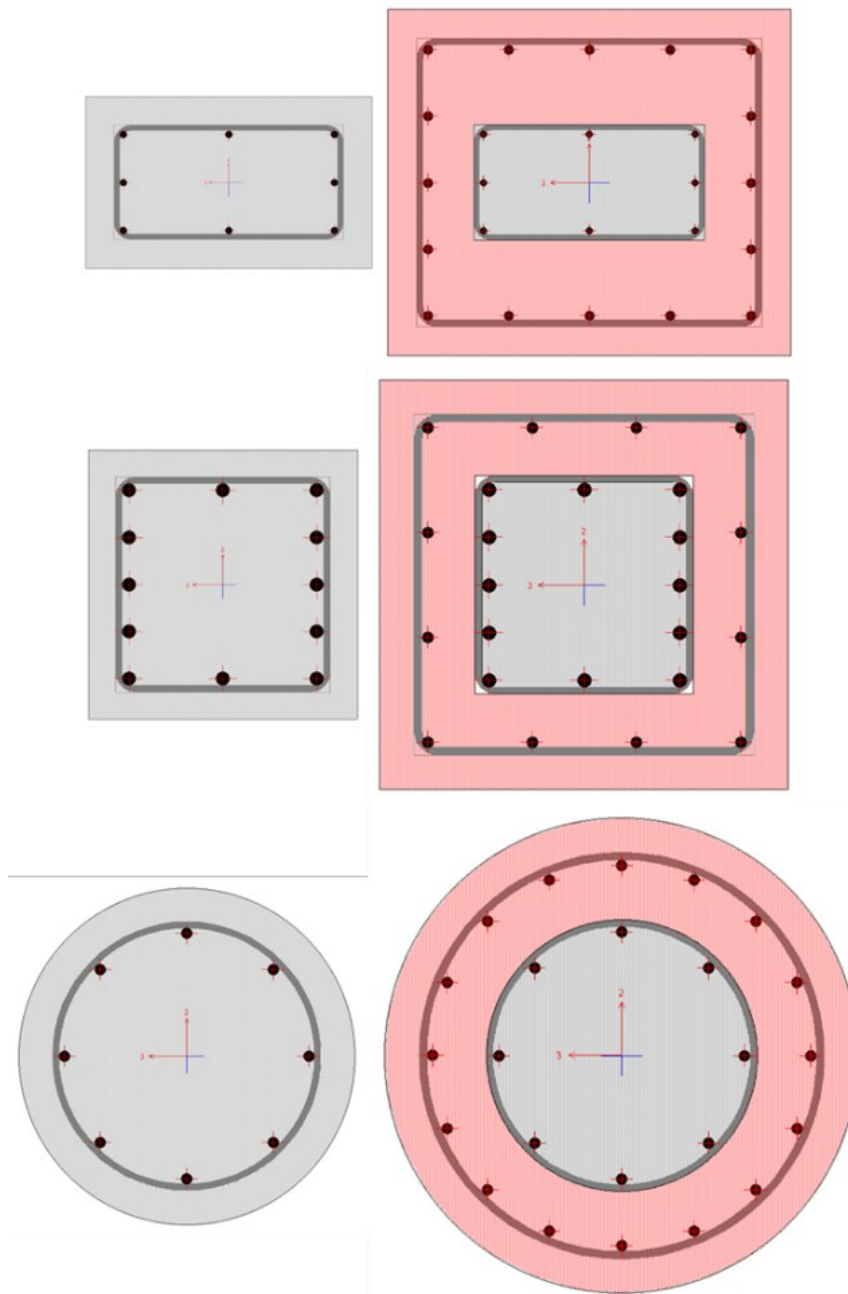
Nota: Las dimensiones están expresadas en centímetros. Las secciones de 30x50 y 40x40 se refieren a columnas rectangulares, y la sección de 50 a una columna circular.

En este sentido, se definieron las secciones estructurales partiendo de las dimensiones externas de las columnas existentes. Como primera acción, se procedió a demoler el recubrimiento, para luego recrecer el núcleo de la sección en todo su perímetro con una capa mínima de concreto. Esta solución permitió garantizar un recubrimiento de protección adecuado y facilitar los procesos constructivos, optimizando la logística en un proyecto con restricciones de acceso y espacio como Star Home.

La Figura 9 muestra la comparación de la capacidad a flexo-compresión de las columnas, mientras la 10 detalla las derivas de la estructura con las columnas reforzadas. Validándose que la estructura tiene una adecuada rigidez lateral.

Desde el punto de vista de capacidad estructural, la columna crítica presenta una relación demanda-capacidad por flexo-compresión biaxial de 0.96, como se evidencia en la 11.

Figura 8. *Esquemas de columnas recrecidas*



Fuente: Autores. Elaborado en software ETABS.

Figura 9. Comparación de diagramas de interacción (Columna original vs. Recrecida)

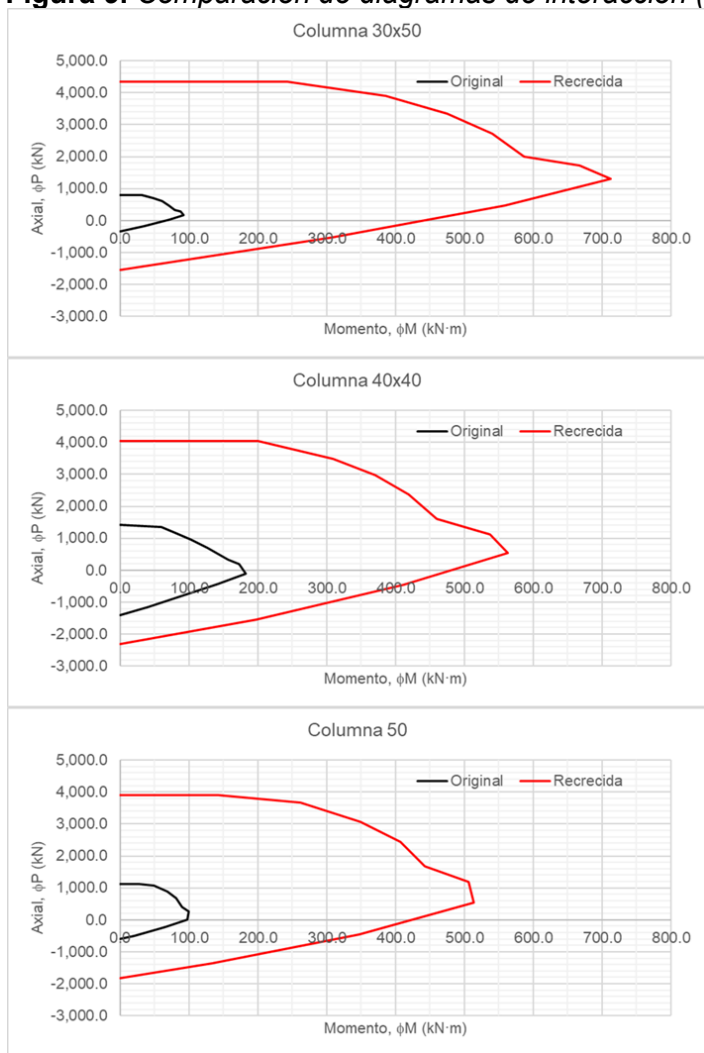
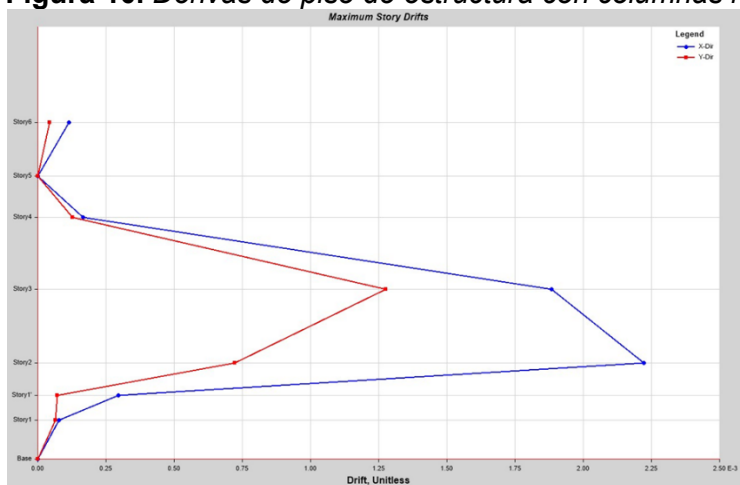


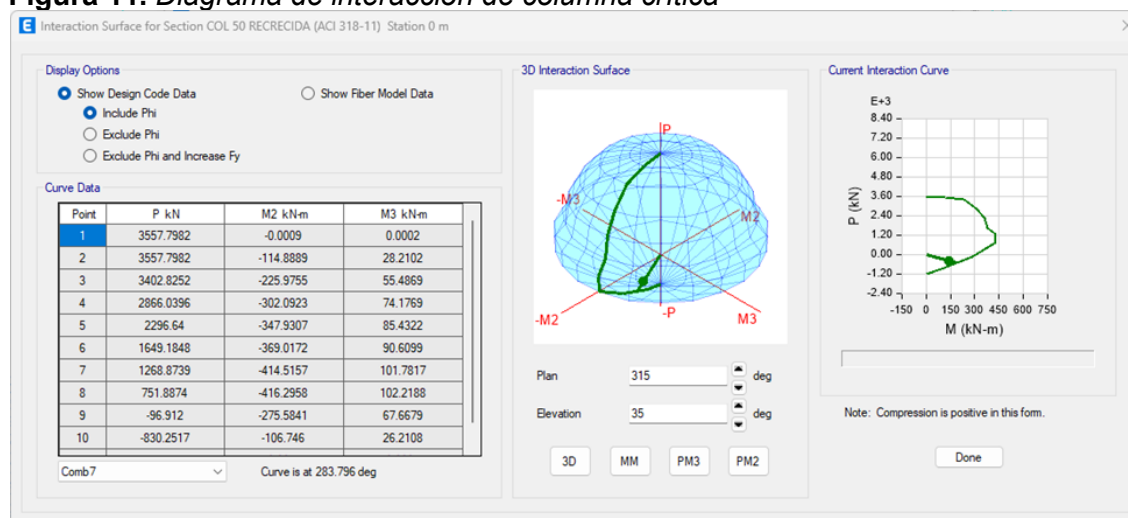
Figura 10. Derivas de piso de estructura con columnas recrecidas



Fuente: Autores. Elaborado en software ETABS.

Tabla 3. Derivas en estructura con columnas recrecidas

Piso	Deriva X	Deriva Y
Story6	0.01%	0.00%
Story5	0.00%	0.00%
Story4	0.02%	0.01%
Story3	0.19%	0.13%
Story2	0.22%	0.07%
Story1'	0.03%	0.01%
Story1	0.01%	0.01%
Base	0.00%	0.00%

Figura 11. Diagrama de interacción de columna crítica

Fuente: Autores. Elaborado en software ETABS.

EMPRESILLADO METÁLICO

El empresillado metálico se seleccionó como alternativa de refuerzo considerando criterios de velocidad de instalación, adaptación a espacios reducidos (típico en rehabilitaciones de edificios en uso) y compatibilidad con las cargas existentes en Star Home. A continuación, se describe el diseño y proceso constructivo:

DISEÑO DEL MARCO METÁLICO

SELECCIÓN DE PERFILES. Para el reforzamiento mediante empresillado metálico, se seleccionaron perfiles que aseguran una rigidez global comparable a la obtenida con el recrecimiento en concreto (Ver Tabla 2).

- Para columnas rectangulares (30×50 cm y 40×40 cm) se emplearon ángulos dobles espalda con espalda (L 100×100×10 mm), configurados para garantizar confinamiento eficiente y facilidad constructiva.

- Para la columna circular ($\varnothing 50$ cm) se optó por perfiles canal C 200×80×6 mm, proporcionando continuidad estructural y adecuada transferencia de esfuerzos.

A continuación, se presentan los resultados de los esfuerzos obtenidos en las columnas modeladas con esta configuración de refuerzo, los cuales permiten evaluar su efectividad frente a cargas axiales y acciones sísmicas.

Figura 12. Curva de interacción con el empesillado metálico para columnas $D=50$ cm

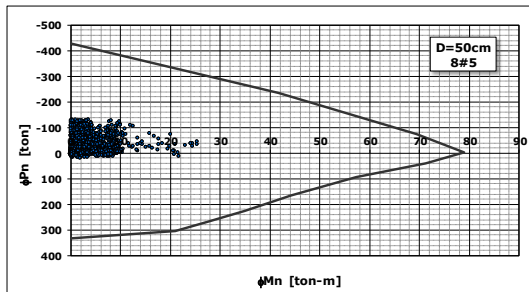
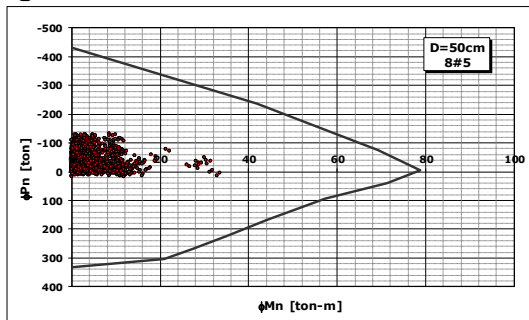
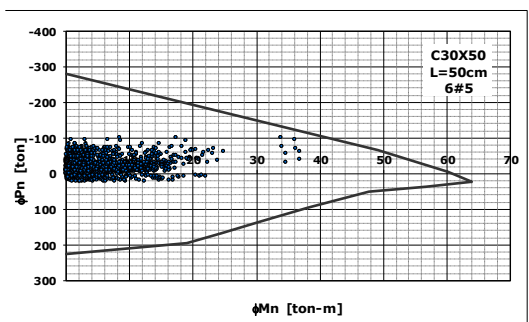
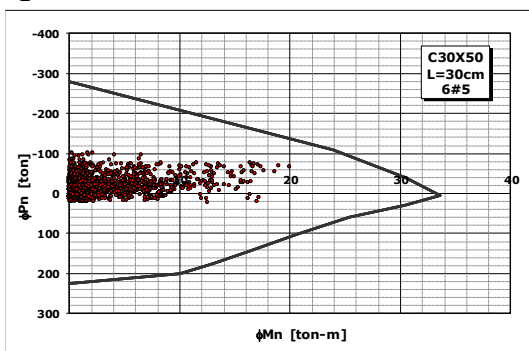
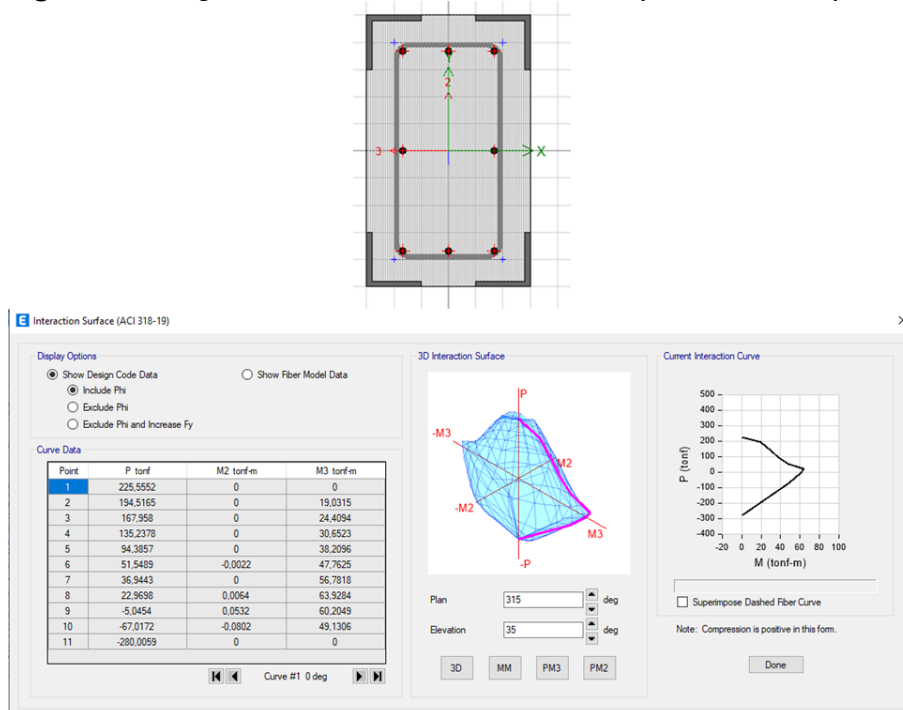


Figura 13. Curva de interacción con el empesillado metálico para columnas 30 x 50



La cuantía de acero se validó mediante diagramas de interacción, verificando que la capacidad a flexo-compresión de la columna reforzada superara la demanda sísmica.

Figura 14. Diagrama de interacción sección compuesta con empresillado metálico



Fuente: Autores. Elaborado en software ETABS.

CONEXIONES. Anclajes químicos: Se diseñaron pernos de diámetro 20 (8.8 ton de capacidad) cada 30 cm en el núcleo de las columnas existentes, previamente limpiado con chorro de arena.

- Soldadura: Las uniones entre perfiles se diseñaron con soldadura de arco protegido (SMAW) usando electrodos E70xx, cumpliendo con el reglamento NSR-10 para juntas a tensión.
- Pretensión: Los pernos se diseñaron tensionados al 70% de su capacidad (14 kN), medido con llave dinamométrica calibrada.

ESPACIAMIENTO Y RIGIDIZACIÓN. Se dispusieron arriostramientos diagonales (\angle 50x50x5 mm) cada 1.5 m en altura para evitar pandeo local del marco.

El recubrimiento mínimo de 3 cm se garantizó con separadores de mortero epóxico, evitando contacto directo con el concreto existente.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ALTERNATIVAS DE REFORZAMIENTO

CONSTRUCTIBILIDAD

la constructibilidad es un factor determinante en la selección de la técnica de reforzamiento, especialmente en edificaciones en uso, donde las intervenciones deben minimizar la afectación a los ocupantes y optimizar el tiempo de ejecución. El análisis comparativo entre las dos alternativas evidencia diferencias relevantes:

CONSTRUCTIBILIDAD RECRECIMIENTO EN CONCRETO

La constructibilidad del recrecimiento en concreto presenta las siguientes características:

SECUENCIA DE ACTIVIDADES:

- Demolición selectiva del recubrimiento (2 cm) mediante picado manual.
- Perforación para dowels ($\varnothing 1/2"$) cada 20 cm.
- Montaje de encofrado metálico modular con tolerancias de ± 5 mm.
- Aplicación de puente de adherencia epóxico.
- Vaciado de concreto de 21 MPa con agregado de 3/4" (15 MPa a 7 días).
- Desencofrado a 7 días y curado con membrana química.

Teniendo en cuenta lo anterior se deben tener las siguientes consideraciones a nivel constructivo:

- **Requerimientos de obra civil:** Involucra actividades como preparación de superficies, escarificación del concreto existente, instalación de conectores mecánicos, armado de refuerzo adicional, encofrado, vaciado y curado.
- **Tiempo de ejecución:** El proceso es más prolongado debido a la necesidad de fraguado y curado del concreto (mínimo 7 días para alcanzar resistencia inicial antes de retirar formaleas y permitir carga completa).
- **Interferencia operativa:** La intervención puede limitar el uso de áreas adyacentes durante la obra, requiriendo planeación logística para mitigar el impacto en la funcionalidad del edificio.
- **Gestión de residuos:** Genera mayor volumen de escombros por la escarificación y demoliciones parciales, lo que incrementa la necesidad de manejo ambiental y disposición adecuada.
- **Seguridad en obra:** La manipulación de formaleas, mezclas de concreto y vibradores incrementa el riesgo operativo, por lo que se deben aplicar estrictos protocolos de seguridad industrial.
- **Control de calidad:** Depende de la correcta ejecución del vaciado y del curado para evitar juntas frías, micro fisuración o baja adherencia en la interfaz existente-nuevo.

CONSTRUCTIBILIDAD EMPRESILLADO METÁLICO

La constructibilidad del empresillado metálico presenta las siguientes características:

SECUENCIA DE ACTIVIDADES:

- Localización de columnas y replanteo con estación total.
- Perforación para anclajes químicos (M20) con broca de diamante ($\varnothing 22$ mm).
- Instalación de pernos químicos (tiempo de curado: 12 horas).
- Montaje de perfiles L 100x100x10 mm y C 200x80x6 mm prefabricados.
- Soldadura de uniones con electrodo E70xx (espesor 8 mm).
- Aplicación de pintura anticorrosiva (3 capas, 150 micras).

Teniendo en cuenta lo anterior se presentan las siguientes consideraciones del proceso constructivo:

- Facilidad de montaje: Se caracteriza por un ensamblaje en seco, mediante fijación de perfiles y soldadura, lo que reduce la complejidad de la intervención.
- Rapidez de instalación: Al no requerir tiempos de fraguado, puede habilitarse la estructura de manera casi inmediata tras la instalación, lo que reduce el tiempo fuera de servicio.
- Mínima generación de residuos: Solo se generan desechos de corte y esmerilado de acero, facilitando el control ambiental de la obra.
- Menor afectación a los ocupantes: Ideal para intervenciones en edificaciones en uso, ya que puede ejecutarse por etapas sin necesidad de desalojar grandes áreas.
- Requerimientos de seguridad: Se debe garantizar el control de chispas por soldadura y protección contra incendio, especialmente en espacios cerrados.
- Precisión dimensional: Requiere una adecuada alineación y ajuste de los perfiles metálicos para garantizar la transferencia uniforme de esfuerzos.

DESEMPEÑO ESTRUCTURAL

Ambas técnicas, encamisado en concreto y empresillado metálico, mejoran la capacidad a flexo-compresión y la resistencia a cortante de las columnas. Sin embargo, su efecto en el desempeño global es diferente:

DESEMPEÑO DEL RECRECIMIENTO EN CONCRETO

Aumenta significativamente el área de la sección y la cuantía de acero longitudinal, mejorando el diagrama de interacción P-M y proporcionando mayor rigidez lateral, lo que reduce la deriva inter-piso. Incrementa la masa estructural, lo que puede elevar la demanda sísmica, pero también mejora la capacidad de disipación de energía al generar un comportamiento más dúctil. Es la alternativa que garantiza el cumplimiento de la condición de columna fuerte – viga débil, reduciendo el riesgo de mecanismos de falla no deseados.

DERIVAS DE PISO

- Máxima deriva en X: 0.22%.
- Máxima deriva en Y: 0.13%.
- Cumplen con el límite de 1% (NSR-10, A.6.3).

DEMANDA-CAPACIDAD

- Columna crítica: Relación D/C = 0.96.

DESEMPEÑO DEL EMPRESILLADO METÁLICO

Ofrece un confinamiento pasivo que mejora la resistencia a compresión y ductilidad, especialmente útil para columnas con deficiencias de cuantía transversal. No incrementa de forma significativa la sección transversal ni la masa estructural, por lo que la demanda sísmica no se ve sustancialmente afectada. Su contribución al aumento de la capacidad a flexo-compresión es limitada, por lo que puede no ser suficiente para columnas con resistencias inferiores a 17 MPa.

DERIVAS DE PISO

- Máxima deriva en X: 0.18%.

- Máxima deriva en Y: 0.11%.
- Mejora del 18% en rigidez lateral vs. recrecido.

DEMANDA-CAPACIDAD

- Columna crítica: Relación D/C = 0.94.
- Ligero mejor desempeño por menor masa adicionada.

A continuación, se presenta la tabla comparativa del desempeño estructural de las dos alternativas:

Tabla 4. Comparativa de desempeño

Aspecto	Recrecimiento en concreto	Empresillado metálico
Deriva máxima	0.22%	0.18%
Relación demanda-capacidad	0.96	0.94

DURABILIDAD

La durabilidad del sistema de reforzamiento es determinante para garantizar el desempeño estructural a largo plazo y minimizar costos de mantenimiento. La comparación entre encamisado en concreto y empresillado metálico muestra diferencias importantes en su comportamiento frente a agentes de deterioro:

DURABILIDAD DEL RECRECIMIENTO EN CONCRETO

- Protección del refuerzo existente: Al añadir una nueva capa de recubrimiento, se restaura la protección frente a agentes agresivos como cloruros, CO₂ y humedad, disminuyendo la tasa de corrosión.
- Reducción de permeabilidad: Un concreto bien diseñado (baja relación agua/cemento, aditivos impermeabilizantes, adecuada compactación y curado) reduce la penetración de agentes agresivos, extendiendo la vida útil de la estructura.
- Monoliticidad y adherencia: La preparación de la superficie (escarificación, limpieza y aplicación de puente de adherencia) es esencial para garantizar la transferencia de esfuerzos y evitar delaminaciones que comprometan la durabilidad.
- Bajo mantenimiento: Una vez ejecutado correctamente, el encamisado requiere mantenimiento mínimo, limitado a inspecciones periódicas para detectar fisuras o desprendimientos de recubrimiento.
- Vulnerabilidades: Si no se controla la retracción y se presentan micro fisuras, se facilita el ingreso de humedad. Además, la porosidad de un concreto mal dosificado podría reducir su desempeño a largo plazo.

DURABILIDAD DEL EMPRESILLADO METÁLICO

- Protección anticorrosiva inicial: Requiere aplicación de recubrimientos como pintura epóxica, galvanizado en caliente o sistemas dúplex (galvanizado + pintura) para evitar corrosión atmosférica.
- Mantenimiento periódico: Para conservar su capacidad, los perfiles metálicos deben ser inspeccionados y repintados en intervalos de 3 a 5 años en ambientes

urbanos moderados, y con mayor frecuencia en ambientes húmedos, marinos o industriales.

- Puntos críticos de corrosión: Zonas de contacto acero-concreto, soldaduras y uniones atornilladas son susceptibles a acumulación de humedad y corrosión localizada si no se sellan correctamente.

Riesgo de pérdida de sección: La corrosión no controlada puede comprometer la sección efectiva de los perfiles, disminuyendo la capacidad de confinamiento y, por ende, la ductilidad ganada con el refuerzo.

- Facilidad de rehabilitación: En caso de daño, es posible reemplazar o reforzar perfiles de forma localizada, lo que representa una ventaja en términos de mantenimiento correctivo.

En la siguiente tabla se presenta la comparación del ciclo de vida de las dos alternativas:

Tabla 5. Comparación de ciclo de vida de las alternativas

Criterio	Encamisado en Concreto	Empresillado Metálico
Vida útil esperada	>40 años (si se controla permeabilidad y fisuración)	15–25 años antes de requerir intervención de protección
Mantenimiento	Mínimo, inspecciones periódicas	Alto, requiere repintado y control de corrosión
Resistencia a ambientes agresivos	Alta (concreto bien dosificado)	Baja si no se aplica sistema de protección adecuado
Riesgo de pérdida de capacidad	Bajo	Alto en caso de corrosión no controlada
Rehabilitación futura	Compleja, requiere demolición parcial si falla	Relativamente sencilla, se pueden reemplazar perfiles

COSTOS

El análisis económico de las alternativas de reforzamiento debe considerar tanto los costos directos de construcción como los costos indirectos y de ciclo de vida, de manera que la decisión no se base únicamente en el presupuesto inicial sino en la eficiencia económica a largo plazo.

COSTOS DEL RECRECIMIENTO EN CONCRETO

- Costos directos: Involucra materiales (concreto, acero de refuerzo, formaletas, conectores) y mano de obra para preparación, vaciado y curado.
- Costos indirectos: Por ser una solución más invasiva, puede requerir desalojo temporal de áreas, mayor logística de protección de acabados y manejo de escombros, lo que aumenta los costos indirectos de la obra.
- Tiempos de ejecución: El fraguado y curado del concreto prolonga el cronograma, lo que puede implicar sobrecostos si la obra se realiza en edificaciones en operación.
- Costos de mantenimiento: Son mínimos a lo largo de la vida útil, limitándose a inspecciones periódicas y reparaciones puntuales en caso de fisuras superficiales.

- Costo del ciclo de vida: Aunque su inversión inicial es mayor, se compensa con un COSTO DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO MUY BAJO EN EL LARGO PLAZO.

COSTOS DEL EMPRESILLADO METÁLICO

- Costos directos: Incluye perfiles de acero, soldaduras, tornillería y pintura anticorrosiva. La mano de obra calificada para montaje metálico puede ser más costosa por hora, pero se reduce el número de jornadas necesarias.
- Costos indirectos: Al ser un sistema en seco y de rápida instalación, genera menor interferencia en la operación de la edificación, reduciendo el impacto económico asociado a pérdida de funcionalidad.
- Tiempos de ejecución: Generalmente inferiores al encamisado en concreto, lo que disminuye los costos indirectos y permite entregar la estructura en menor tiempo.
- Costos de mantenimiento: Son más altos, ya que requieren repintado y control de corrosión cada 3 a 5 años (dependiendo de las condiciones ambientales), lo que puede representar un gasto recurrente significativo.
- Costo del ciclo de vida: Aunque la inversión inicial es competitiva y los tiempos de obra reducidos, los costos acumulados de mantenimiento pueden igualar o superar los del encamisado en concreto en un horizonte de 20–30 años.

Tabla 6. Comparación económica

Criterio	Encamisado en Concreto	Empresillado Metálico
Inversión inicial	Alta	Media
Tiempo de ejecución	Largo	Corto
Interferencia operativa	Alta	Baja
Costos indirectos	Moderados–Altos	Bajos
Mantenimiento a largo plazo	Bajo	Alto (pintura y control de corrosión)
Costo de ciclo de vida	Competitivo	Puede aumentar si no se gestiona el mantenimiento
Criterio	Encamisado en Concreto	Empresillado Metálico
Inversión inicial	Alta	Media

Tabla 7. Análisis de costos por alternativa

Aspecto	Encamisado en concreto	Empresillado metálico
Tiempo de ejecución	15 días/nivel	5 días/nivel
Interrupción de uso	Moderada (Apuntalamiento)	Mínima (Trabajo en seco)
Costo	468000 \$/m ²	370000 \$/m ²

Tabla 8. Comparación integral de técnicas de refuerzo en columnas

Criterio	Encamisado en concreto	Empresillado metálico
Constructibilidad	Requiere demolición parcial, encofrado y vaciado; mayor tiempo de ejecución y afectación al uso	Montaje rápido en obra, adecuado para espacios reducidos; mínima afectación al funcionamiento
Desempeño estructural	Incremento mayor en capacidad a flexo-compresión ($\approx 15\%$), rigidez y control de derivas (20%)	Mejora en ductilidad y cortante, pero limitada contribución a flexión
Durabilidad	Alta, protege contra corrosión y restaura secciones deterioradas; ciclo de vida >40 años	Vulnerable a corrosión sin protección adecuada; requiere mantenimiento periódico
Costos iniciales	Más elevados (materiales y tiempos de obra)	Menores costos iniciales de instalación
Costos ciclo de vida	Más favorables: menor mantenimiento y mayor durabilidad a largo plazo	Más altos: requiere mantenimiento y protección anticorrosiva
Normativa / seguridad sísmica	Cumple plenamente criterio "columna fuerte-viga débil"	Cumple parcialmente; mejora ductilidad, pero menor capacidad flexo-compresiva
Aplicabilidad recomendada	Columnas con $f'c < 17$ MPa o deficiencia flexo-compresiva crítica	Columnas con deficiencia en cortante o necesidad de rápida intervención

Los resultados confirman la hipótesis planteada: el análisis comparativo entre encamisado y empresillado permite definir criterios claros de selección. El encamisado resulta más favorable en términos de seguridad estructural y durabilidad, mientras que el empresillado es ventajoso en intervenciones rápidas y con limitaciones de espacio o costo inicial.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en el análisis comparativo entre el encamisado en concreto y el empresillado metálico confirman la hipótesis inicial: la selección de una técnica de refuerzo no puede depender únicamente de criterios empíricos o de costo inicial, sino que requiere una evaluación integral que considere desempeño estructural, durabilidad, constructibilidad y ciclo de vida.

En términos de desempeño estructural, el encamisado en concreto mostró los mayores beneficios, incrementando la capacidad a flexo-compresión en un 15% y reduciendo las derivas en un 20%. Estos resultados garantizan el cumplimiento del criterio de "columna fuerte – viga débil", reduciendo significativamente la vulnerabilidad sísmica. En contraste, el empresillado metálico, aunque mejora la ductilidad y la resistencia a cortante, presenta una contribución más

limitada a la capacidad flexo-compresiva, lo que restringe su aplicación en columnas con resistencias inferiores a 17 MPa.

En cuanto a durabilidad, los hallazgos muestran que el encamisado ofrece una solución más robusta y de mayor ciclo de vida, al restaurar la sección dañada y proveer una nueva barrera protectora contra agentes externos. El empresillado, por su parte, requiere un mantenimiento continuo para prevenir la corrosión, lo que incrementa los costos de largo plazo.

El análisis de constructibilidad evidenció un contraste claro: el encamisado demanda procesos más invasivos, mayor tiempo de ejecución y afecta la operatividad de la edificación durante la obra, mientras que el empresillado destaca por su rapidez de instalación y menor impacto en edificaciones en uso. Esto posiciona al empresillado como una solución viable en proyectos donde las condiciones logísticas o de ocupación no permiten intervenciones prolongadas.

Desde la perspectiva de costos, los resultados confirman que, aunque el empresillado implica menores costos iniciales, el encamisado resulta más favorable en el análisis de ciclo de vida. Esto refuerza la importancia de que las decisiones técnicas consideren no solo el valor inicial de la intervención, sino también los costos asociados a mantenimiento, durabilidad y seguridad estructural a largo plazo.

Finalmente, la comparación integral (Tabla 8) evidencia que cada técnica tiene un nicho de aplicación específico. El encamisado es más apropiado cuando se requiere una mejora significativa en capacidad estructural y durabilidad, mientras que el empresillado se perfila como una alternativa en escenarios donde se prioriza la rapidez de intervención y el bajo costo inicial.

En síntesis, la discusión de resultados demuestra que ninguna técnica es universalmente superior; más bien, su efectividad depende de los criterios de desempeño priorizados en cada proyecto. Este análisis aporta lineamientos claros para la práctica profesional en rehabilitación de estructuras de concreto armado en Colombia.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON ESTUDIOS PREVIOS

Los resultados obtenidos en el presente estudio muestran que el encamisado en concreto incrementó de manera significativa la capacidad a compresión y el nivel de confinamiento del refuerzo longitudinal, lo cual coincide con lo reportado en intervenciones institucionales en Colombia, como el caso de la Torre B del Instituto Nacional de Medicina Legal, donde el encamisado fue seleccionado por su aporte simultáneo a resistencia axial y rigidez lateral (Instituto Nacional de Medicina Legal, 2018). De forma similar, en el reforzamiento de sedes del SENA en Girón, la técnica fue considerada la alternativa más adecuada frente a otras soluciones de refuerzo, debido a su mayor durabilidad y compatibilidad con la estructura original (Findeter, 2021).

Sin embargo, a diferencia de estos casos donde la intervención buscaba principalmente restituir capacidad estructural bajo demandas sísmicas moderadas, en el presente proyecto el encamisado también evidenció una mejora en el comportamiento frente a fenómenos de fisuración asociada a retracción y carga cíclica, lo cual no fue documentado explícitamente en los estudios previos. Este aspecto resalta la pertinencia de evaluar no solo la capacidad última sino también el desempeño en servicio.

En contraste, el empresillado metálico, aunque mostró un incremento menor en la capacidad axial respecto al encamisado, presentó ventajas constructivas comparables a las señaladas en casos internacionales. Tal como se documentó en los reforzamientos de puentes en California, la instalación de elementos metálicos permitió una rehabilitación rápida con mínima interferencia en el funcionamiento de la estructura (Priestley et al., 1996). De igual manera, en las intervenciones realizadas por Concremex en Monquirá, el empresillado fue preferido por su bajo impacto geométrico y la posibilidad de ejecución sin retiro total de recubrimiento (Concremex, s.f.).

No obstante, a diferencia de lo encontrado en Japón, donde los anillos metálicos han demostrado excelente desempeño en confinamiento a largo plazo (Japan Road Association, 2002), los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que la eficacia del empresillado depende de la compatibilidad entre el acero y el concreto existente, así como del control del espaciamiento y la rigidez transversal del dispositivo.

En síntesis, los resultados coinciden con la literatura en que el encamisado en concreto ofrece mayor capacidad resistente final, mientras que el empresillado ofrece rapidez y mínima alteración geométrica. Sin embargo, la presente investigación aporta evidencia experimental sobre el desempeño post-intervención en términos de fisuración, retracción y ductilidad, aspectos poco abordados en los estudios documentados y que resultan relevantes para decisiones de intervención en estructuras existentes.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El análisis comparativo permitió confirmar la hipótesis inicial: la evaluación estructural detallada de las técnicas de encamisado en concreto y empresillado metálico proporciona criterios técnicos sólidos para seleccionar la alternativa más adecuada en edificaciones con patologías similares al proyecto Star Home.
- De acuerdo con la Tabla 8, el encamisado en concreto ofrece mayores ventajas en capacidad a flexo-compresión, rigidez, control de derivas y durabilidad, cumpliendo con el criterio de “columna fuerte – viga débil” y reduciendo de manera significativa la vulnerabilidad sísmica.
- El empresillado metálico, aunque presenta menores beneficios estructurales en términos de capacidad flexo-compresiva, constituye una alternativa de intervención rápida, con menores costos iniciales y mayor viabilidad en edificaciones en uso donde se requiera mínima afectación operativa.
- La comparación integral demuestra que la elección de la técnica de refuerzo no debe basarse únicamente en el costo inicial, sino en un análisis multivariable que incluya desempeño estructural, durabilidad, constructibilidad y costos de ciclo de vida.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda aplicar encamisado en concreto en columnas con resistencia a compresión inferior a 17 MPa, deficiencias de refuerzo longitudinal y patologías de durabilidad severas, garantizando una mejora integral en capacidad estructural y ciclo de vida.

- Se recomienda implementar empresillado metálico en situaciones donde se requiera intervención rápida, con espacios reducidos o en proyectos que deban mantenerse en operación durante la obra, siempre que las columnas no presenten deficiencias críticas en flexo-compresión.
- Se recomienda priorizar el análisis comparativo mediante modelación numérica y criterios normativos antes de seleccionar la técnica de refuerzo, evitando decisiones empíricas basadas únicamente en costo inicial o experiencia previa.
- Se recomienda incluir en futuros proyectos la evaluación del costo del ciclo de vida como variable determinante en la selección de la técnica, ya que el encamisado, aunque más costoso al inicio, ofrece ahorros significativos en mantenimiento y mayor durabilidad.
- Se recomienda complementar este tipo de estudios con ensayos experimentales a escala real en el contexto colombiano, que permitan validar los resultados de la modelación numérica y enriquecer los criterios de selección para la práctica profesional.

BIBLIOGRAFIA

- Bernal, G., & Yamín, L. (2011). Refuerzo de estructuras de concreto en Colombia: experiencias y lecciones aprendidas. *Revista Ingeniería UC*.
- (AIS), A. C. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR-10*. AIS.
- (FEMA), F. E. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings (FEMA 356)*. Washington, D.C: Federal Emergency Management Agency.
- 440.2R-17, A. C. (2017). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*. American Concrete Institute.
- Badarloo, B., & Lehner, P. (2023). Practical Aspects of Correlation Analysis of Compressive Strength from Destructive and Non-Destructive Methods in Different Directions. *Infrastructures*, 155.
- Fan, Y., Liguí Yang, Yuyin Wang, & et al. (2025). Experimental study on square RC short columns strengthened with corrugated steel jacket under axial compression.
- Ghobarah, A., & Said, A. (2001). Seismic rehabilitation of beam-column joints using FRP laminates. *Journal of Earthquake Engineering*, 113–129.
- Ironni Sococol, I., Dăescu, I., & Moșoarcă, M. (2022). The impact of transverse confinement of RC columns on the seismic response of the reinforced concrete frame structure. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. construction-architecture section*, 69-91.
- Issa, M. S. (2021). Shear strength evaluation in the existence of axial load for RC columns.
- Saidi, T., Putra, R., Amalia, Z., & Munawir, M. (2023). Contribution of transverse reinforcement configuration on concrete shear capacity of RC column. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 127–135.
- Scala, S., & Colleagues. (2024). Code-based brittle capacity models for seismic assessment of reinforced concrete buildings. *Springer*.
- Torres, L., & López, M. (2015). Comparative performance of RC columns retrofitted with steel jackets, FRP and UHPC. *Construction and Building Materials*, 78, 235–245.
- Villar-Salinas, S., Guzmán, A., & Carrillo, J. (2021). Performance evaluation of structures with reinforced concrete columns retrofitted with steel jacketing. *Journal of Building Engineering*, 33.
- Waenpracha, A., & Pannachet, T. (2024). Experimental investigation on axial strength improvement of cold-formed steel jacketed concrete stub columns. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Article 64.
- Japan Road Association. (2002). *Seismic retrofit manual for highway bridges*. Tokyo.
- Priestley, M., Seible, F., & Calvi, G. (1996). *Seismic design and retrofit of bridges*. McGraw–Hill.
- Sezen, H., & Moehle, J. (2004). Gravity load collapse of reinforced concrete frames during the 1999 Kocaeli, Turkey earthquake. *Earthquake Spectra*, 20(1), 171–190.

ANEXOS

ANEXO 1 – LEVANTAMIENTO DE LESIONES

Se realizaron visitas de inspección los días 09, 10 y 11 de enero de 2025, con el propósito de identificar lesiones estructurales en vigas, columnas, losas y cimentación. Durante este proceso se documentaron las siguientes condiciones:

- Registro fotográfico detallado de las patologías encontradas.
- Identificación de elementos estructurales afectados.
- Clasificación de los daños según su naturaleza: Lesiones de durabilidad (problemas relacionados con la calidad del concreto y la exposición ambiental) y lesiones mecánicas (fisuración por flexión, corte o sobrecarga).
- Revisión de diferencias entre los planos originales y lo construido.

Con base en la información obtenida, se realizó un análisis técnico de las patologías identificadas, estableciendo posibles causas, implicaciones y necesidades de intervención. Este proceso incluyó la comparación de los resultados de los ensayos con los valores normativos de referencia y la correlación de las deficiencias estructurales detectadas con las condiciones constructivas y ambientales del sitio. Esta información se recopiló en fichas de inspección a continuación se presentan las fichas de localización de lesiones y el resumen de las lesiones más representativas para el análisis de este documento.

Figura 15. Ficha de ubicación de lesiones nivel -2

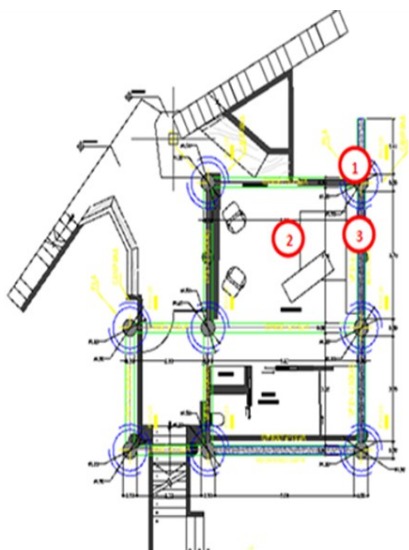
Ficha de Ubicación de lesiones				
Proyecto:	STAR HOME			
Fecha:	9/01/2025	Diligenciado por:	Jeniffer Sanchez, Adriana Fernandez, Humberto Marín	
Dirección:	Condominio Unión Las Palmas	Temperatura:	max 24° / min 12°	
NIVEL-2				
				
Nomenclatura	Nombre de la lesión	Ubicación	Gravedad	Tipo de lesión
1	Columna saturada, desmoronamiento del concreto	G4	Alta	Secundaria
2	fisuraras por falla de flexión en placa	Ejes 3-4 entre F y G	Alta	Primaria
3	humedad en muros de mampostería	Eje 4 entre ejes F y G	Moderada	Secundaria

Figura 16. Ficha de ubicación de lesiones nivel -1


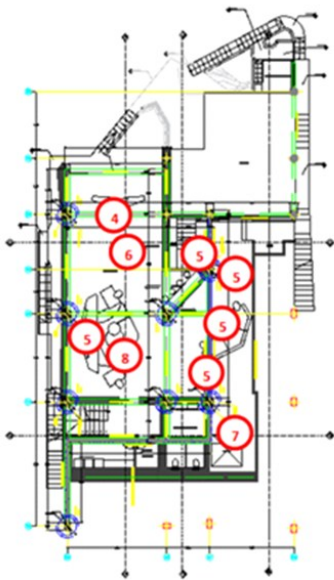

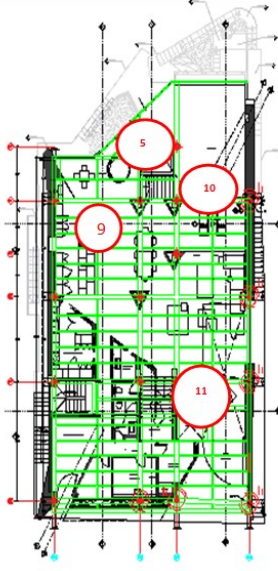
Ficha de Ubicación de lesiones				
Proyecto:	STAR HOME			
Fecha:	9/01/2025	Diligenciado por:	Jeniffer Sanchez, Adriana Fernandez, Humberto Marín	
Dirección:	Condominio Unión Las Palmas	Temperatura:	max 24° / min 12°	
NIVEL-1				
				
Nomenclatura	Nombre de la lesión	Ubicación	Gravedad	Tipo de lesión
4	Fisuras por flexión en vigas	Viga eje 1' entre ejes (A, B, C, D, D)	Moderada	Primaria
5	Hormigueros en elementos de concreto	Vigas y viguetas placa aérea Nivel-1	Alta	Primaria
6	Pases de tubería incorrectos	Nervio 5 losa aérea Nivel-1	Alta	Secundaria
7	Filtración de agua	Nivel-1 Zona de ascensor	Alta	Primaria
8	Falta de recubrimiento	Placa aérea Nivel-1	Moderada	Primaria



Figura 17. Ficha de ubicación de lesiones nivel 1

Ficha de Ubicación de lesiones				
Proyecto:	STAR HOME			
Fecha:	9/01/2025	Diligenciado por:	Jeniffer Sanchez, Adriana Fernandez, Humberto Marín	
Dirección:	Condominio Unión Las Palmas	Temperatura:	max 24° / min 12°	
NIVEL 1				
				
Nomenclatura	Nombre de la lesión	Ubicación	Gravedad	Tipo de lesión
5	Hormigueros en elementos de concreto	Zona de voladizo placa aérea	Moderada	Primaria
9	Secciones de viguetas menores a 10 cm	Viguetas placa aérea Piso 1	Alta	Primaria
10	Vibraciones excesivas en voladizo	Voladizo placa aérea	Alta	Secundaria
11	Conexiones de perfil metálico	Voladizo adyacente foso del ascensor	Alta	Primaria

Para cada lesión identificada se elaboró una ficha de registro técnico, en la que se consignaron de manera sistemática los aspectos más relevantes: descripción, posible causa, localización, extensión y una evaluación del nivel de severidad. Estas fichas constituyen un insumo fundamental para el diagnóstico estructural y la priorización de intervenciones.

A continuación, se presenta como ejemplo algunas de las fichas correspondientes a las lesiones de mayor relevancia para el desarrollo de esta investigación.

Figura 18. Ficha de análisis de lesión columna de sótano

FICHA DE ANALISIS DE CADA LESION				
Proyecto:	STAR HOME			
Fecha:	13/01/2025	Diligenciado por:	Jennifer Sanchez, Adriana Fernandez, Humberto Marín	
Dirección:	Condominio Unión Las Palmas	Temperatura:	Max 24° / min 12°	
Nomenclatura de la lesión: 1				
Tipo de lesión	Columna saturada, desmoronamiento del concreto			
Elementos afectados:	Columna G4	Registro Fotográfico		
Agravantes	Este elemento estructural presenta baja capacidad debido a su condición de saturación y deficiencia en la aglomeración de agregados y pasta cementante, no tendrá la capacidad para resistir cargas adicionales.			
Causa directa	Deficiencia en el material cementante			
Causa indirecta	Saturación del elemento			
Gravedad	Alta			
Prediagnóstico	Baja calidad del concreto, poca adherencia entre la pasta cementante y los agregados			
Eliminación de la causa	Realizar filtro que canalice aguas subterráneas			
Eliminación del efecto	Diseño de reforzamiento en estructuras y remplazo del elemento			
Ensayos asociados:	No fue posible realizar ensayo de núcleos porque el material no tenía capacidad para sostener el taladro, debido a la saturación no fue posible hacer toma de esclerometría			
Descripción del proceso Patológico: La columna presenta un avanzado deterioro del concreto, desmoronándose al contacto con la mano. Debido a su fragilidad no fue posible extraer núcleos, ya que el material no soporta el anclaje del equipo. Además, la columna se encuentra completamente saturada, lo que puede acelerar los procesos de corrosión del refuerzo. La ejecución de la prueba de esclerometría tampoco fue viable dado que la saturación del concreto no es compatible con los requisitos normativos vigentes. Cabe destacar que este elemento estructural debería soportar las cargas adicionales derivadas de la biopiscina.				

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las lesiones más representativas identificadas durante la inspección, incluyendo su nivel de gravedad y las principales observaciones realizadas en campo. Este consolidado permite visualizar de manera sintética el estado de los elementos estructurales y sirve como base para el análisis de vulnerabilidad y la definición de estrategias de reforzamiento.

RESUMEN DE FICHAS TÉCNICAS DE HISTORIA CLÍNICA

Tabla 9. Resumen de Lesiones

Nomenclatura	Nombre de la lesión	Ubicación	Gravedad	Observación
5	Hormigueros en elementos de concreto	Placa aérea zona de voladizo	Moderada	Falta de compactación del concreto durante la fundición
6	Secciones de viguetas menores a 10 cm	Viguetas placa aérea Piso 1	Alta	Reducción de capacidad resistente; riesgo de colapso
10	Vibraciones excesivas en voladizo	Voladizo placa aérea	Alta	Luz de 5 m no prevista en diseño; modificaciones no documentadas

11	Conexiones de perfil metálico	Voladizo adyacente al foso del ascensor	Alta	Deficiente transferencia de cargas entre perfil metálico y concreto
12	Fallas por flexión	Placa aérea zona de vestier	Moderada	Luz entre apoyos excesiva; esfuerzos de flexión superan capacidad del concreto
13	Falla por esfuerzos de corte en placa	Placa aérea habitación principal	Alta	Concentración de esfuerzos por columna corta; fisura diagonal a 45°
14	Falla por esfuerzos de corte en viga	Viga aérea habitación principal	Alta	Hormigueros y eflorescencias; insuficiencia de refuerzo transversal
15	Refuerzo metálico sin contacto	Placa aérea habitación principal y cubierta	Alta	Vigas metálicas IPE no en contacto con losas; anula efectividad del refuerzo

ANEXO 2 – RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados en laboratorio y en campo, incluyendo esclerometrías, extracción y análisis de núcleos de concreto, y exploraciones con escáner de elementos estructurales. Los resultados obtenidos proporcionan información clave para determinar la capacidad resistente, detectar posibles patologías y plantear estrategias de intervención y mantenimiento necesarias para garantizar la durabilidad y seguridad de la edificación anexo a este documento se entrega informe de laboratorio INGECONCRETO:

Figura 19. Resultados de núcleos de concreto

MUESTRA	F./SOLICITU	NUCLEO	H	D=(d)	A	V	P	D	Hr	Hr/D	F.C.	C.máx.	Rc*	LOCALIZACIÓN	OBSERVACIO	F/EXTRACCIO	F/PRUEBA	PLEX/TF
No.	aaaa/mmdd	No.	mm	mm	mm2	cm3	g	kg/m3	mm			kN	MPa		aaaa/mmdd	aaaa/mmdd		
1	2025/01/13	0001	153	73,4	4231	649	1504	2317	153	2,09	0,97	36,6	8,8	Columna F4	Nivel -4,45	2025/01/15	2025/01/22	C
2	2025/01/13	0002	88,4	72,6	4140	366	816	2230	88,4	1,22	0,92	36,7	8,2	Viga e; eje (2-3)	Nivel -2,65	2025/01/15	2025/01/22	B
3	2025/01/13	0003	161	72,7	4151	670	1601	2390	161	2,22	0,95	81,5	18,7	Columna C1	Nivel -2,65	2025/01/15	2025/01/22	B
4	2025/01/13	0004	91,1	72,6	4140	377	825	2188	91,1	1,25	0,93	35,3	7,9	Columna E1	Nivel -2,65	2025/01/15	2025/01/22	C
5	2025/01/13	0005	190	72,6	4140	619	1428	2307	190	2,06	0,97	123,5	29,0	Viga 2; eje (C-E)	Piso 1	2025/01/15	2025/01/22	D
6	2025/01/13	0006	130	72,6	4140	537	1156	2152	130	1,79	0,98	20,0	4,7	Columna A2	Piso 1	2025/01/15	2025/01/22	C
7	2025/01/13	0007	112	72,5	4128	462	957	2072	112	1,54	0,97	15,7	3,7	Columna A3	Piso 2	2025/01/15	2025/01/22	C
8	2025/01/13	0008	151	72,5	4128	622	1351	2172	151	2,08	0,97	54,0	12,7	Viga B; eje (3-4)	Piso 2	2025/01/15	2025/01/22	D
9	2025/01/13	0009	152	72,6	4140	630	1452	2306	152	2,10	0,97	92,2	21,6	Viga 1; voladizo	Piso 2	2025/01/15	2025/01/22	D
10	2025/01/13	0010	97,8	72,7	4151	406	943	2323	97,8	1,35	0,94	31,8	7,2	Columna B4	Piso 2	2025/01/15	2025/01/22	C
11	2025/01/13	0011	79,8	72,5	4128	329	740	2250	79,8	1,10	0,90	30,1	6,5	Columna E1	Piso2	2025/01/15	2025/01/22	C
12	2025/01/13	0012	91,1	72,5	4128	376	827	2198	91,1	1,25	0,93	84,5	20,47	Pila E1	Cimen	2025/01/20	2025/01/24	B

----- FIN DE RESULTADOS -----

Nomenclatura: H: Altura, Ø 20; Diámetro, A: Área, V: Volumen, P: Peso D: Densidad, Hr: Altura rebotado, F.C.: Factor de Corrección Rc*: Resistencia Compresiva, C.máx.: Carga aplicada PL, EX: Plano de Extracción del núcleo PAR: Paralelo al plano de vaciado PER: Perpendicular al plano de vaciado	TF: Tipos de Falla 	Especificación NSR 10 C.3.4.5.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN PROMEDIO (3 núcleos) ≥ 85% de f _c INDIVIDUAL ≥ 75% de f _c
--	------------------------	---

Figura 20. Resultados de esclerometría

CORRELACIÓN OBTENIDA: $R = 0,0438D^2 - 1,275D + 11$ R(MPa), D=Distancia Rebote

RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Elemento	Descripción Elemento	Rebote Esclerómetro Promedio	Resistencia Estimada (MPa)
1	Viga piso 2; diagonal entre (B-D)	40,66	31,5
2	Viga piso 2; voladizo entre (A-B)	32,86	16,3
3	Columna 3A3; piso 2.	27,70	9,3
4	Columna 2A; piso 1.	32,00	15,0
5	Columna 4B; piso 2.	28,96	10,8
6	Columna 1C; nivel - 2,65.	31,36	14,0
7	Columna 1E; nivel -2,65.	26,86	8,3
8	Columna piscina; CM.	27,30	8,8
9	Columna 4F; nivel - 4,45.	27,66	9,2
10	Viga F; nivel - 2,65 entre (2-3).	43,33	37,9
11	Viga E; piso 1, entre (1-2).	41,63	33,7
12	Viga C; piso 1, entre (1-2).	41,36	33,1
13	Viga B; piso , entre (2-3).	39,46	28,8
14	Viga 2; piso 2, entre (E-F).	35,10	20,1
15	Viga F; piso 2, entre (1-2).	36,63	23,0
16	Viga F'; piso 2, entre (2-3).	41,62	33,7

Figura 21. Resultados de escáner**RESULTADOS DE LOS ENSAYOS****Objetivo:**

Determinar la posición aproximada de barras de refuerzo longitudinales y transversales en un (1) elemento de concreto.

Forma como se realizó el ensayo:

En el elemento en estudio, se realizó un barrido efectuando las lecturas de extremo a extremo en su cara frontal (longitudinal) y en su cara transversal (ancho), determinando así aproximadamente la posición del refuerzo.

Resultados obtenidos:

<i>Muestra N°</i>	<i>Elemento</i>	<i>Localización</i>	<i>Cantidad Longitudinal</i>	<i>Separación (cm)</i>	<i>Cantidad Estribos</i>	<i>Separación (cm)</i>
<i>1</i>	<i>Viga aérea, longitud 12.2 m</i>	<i>Losa piso 2; viga 2, eje B y E</i>	<i>3 barras</i>	<i>Entre 10 y 15 cm</i>	<i>33</i>	<i>Entre 12 y 15 cm</i>

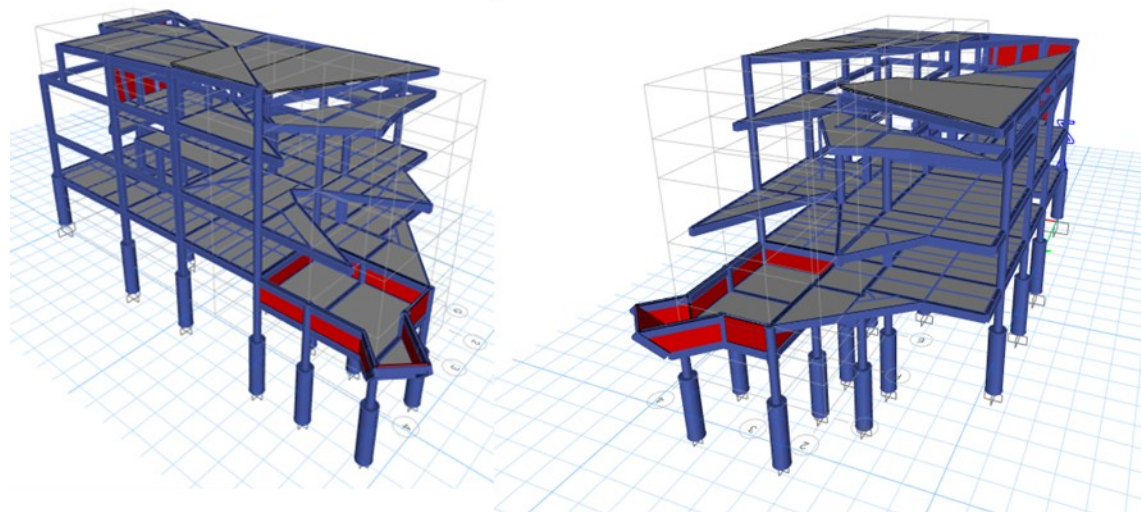
FECHA DE REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS: 2025 enero 15.

Los resultados obtenidos muestran que varios elementos estructurales, específicamente columnas, presentan resistencias a la compresión que no cumplen con los criterios establecidos por la NSR-10. Resistencia mínima del concreto estructural: Según el Capítulo C.5 de la NSR-10, ningún elemento estructural puede tener una resistencia a la compresión inferior a 17 MPa. Criterios de aceptación de núcleos: El promedio de tres núcleos extraídos debe ser al menos el 85% de la resistencia especificada (f_c). Además, ningún núcleo individual debe tener una resistencia menor al 75% de f_c .

ANEXO 3 – RESUMEN DE ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA

Para el análisis estructural se realizó un modelo con materiales, secciones y geometrías propias de cada elemento. La vivienda se realizó en el programa ETABS21, en donde las vigas y columnas se utilizaron elementos tipos “*frame*”; las placas se modelaron utilizando elementos tipo membrana que sirven exclusivamente para cargar en el modelo, este elemento no proporciona rigidez a la estructura.

Figura 22. Modelo Sap2000 análisis de vulnerabilidad sísmica



Fuente: Autores. Elaborado en software ETABS.

En la siguiente tabla se presentan los parámetros sísmicos y de diseño utilizados en la modelación de acuerdo con la ubicación del proyecto y las condiciones actuales de la estructura.

Tabla 10. Parámetros sísmicos y de diseño

Nomenclatura	Nombre de la lesión	Ubicación
Aa (aceleración pico efectiva)	0.15	Medellín, amenaza intermedia
Av (velocidad pico efectiva)	0.2	
Perfil de suelo	D	Suelo rígido
Ro (coeficiente de disipación básico)	5.00	Pórticos de concreto reforzado
R (coeficiente final de disipación)	2.40	Reducido por irregularidades

La revisión de las columnas que son elementos sometidos principalmente a Flexo-Compresión y Cortante se gobiernan por dos criterios esencialmente: el primero es que tenga las características de resistencia suficiente dadas las solicitaciones de cargas y segundo que tenga los detalles del refuerzo necesarios para la estructura tenga la capacidad de disipación energía suficiente. Se identificó que las columnas no cumplen con la cuantía mínima de refuerzo, adicionalmente no cumplen con la condición de columna fuerte viga débil estipulada por el reglamento NSR-10. Y se sobrepasan los esfuerzos a flexo-compresión como se puede verificar en las siguientes figuras:

Figura 23. Curva interacción columnas $D=0.50\text{ m}$

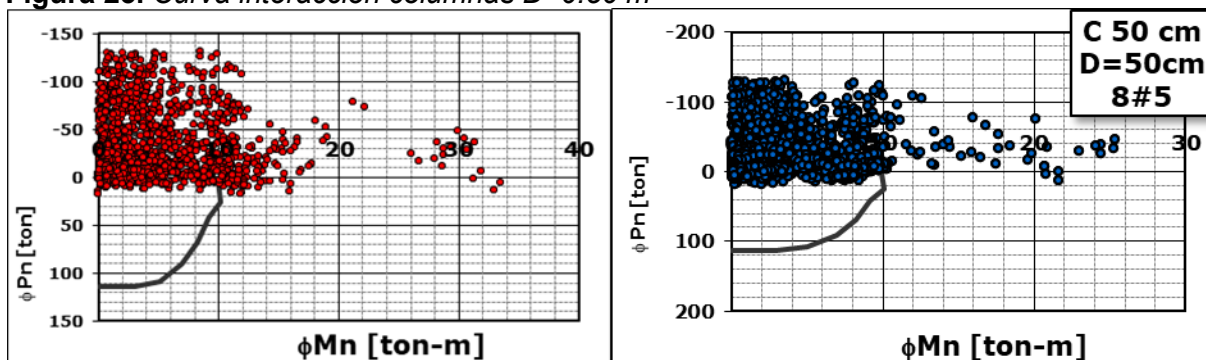
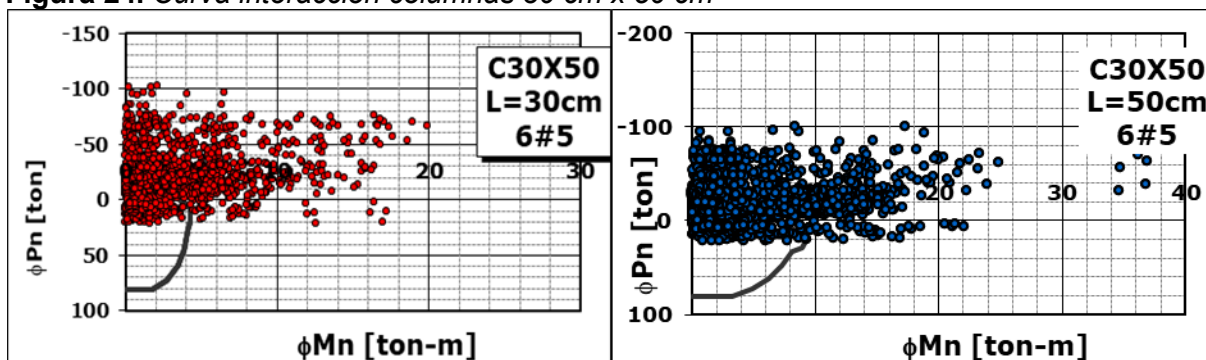
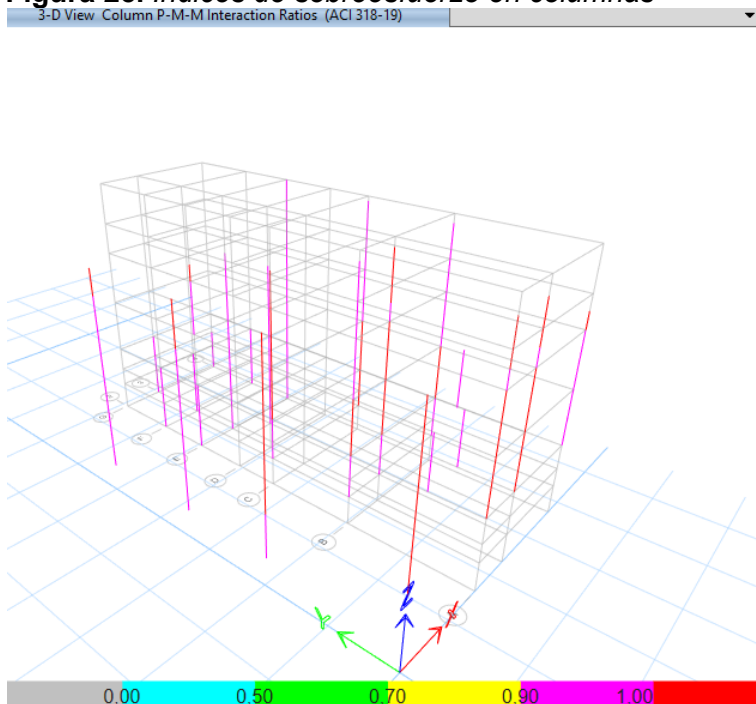


Figura 24. Curva interacción columnas $30\text{ cm} \times 50\text{ cm}$



A modo de resumen se presenta el gráfico con el cálculo de índices de sobreesfuerzo dado por el programa y en la tabla 3 se presentan los resultados críticos derivados del análisis:

Figura 25. Índices de sobreesfuerzo en columnas



Fuente: Autores. Elaborado en software ETABS.

La Tabla 11 resume los resultados más críticos obtenidos durante el análisis de vulnerabilidad estructural. Se presentan los principales parámetros evaluados, su comparación frente a los límites establecidos en la NSR-10 y las implicaciones técnicas de su incumplimiento. Estos resultados evidencian problemas de resistencia en columnas, excesiva flexibilidad global y riesgo de mecanismos de falla indeseados, aspectos que comprometen el desempeño sísmico de la edificación.

Tabla 11. Resultados críticos

Aspecto Evaluado	Valor/Estado	¿Cumple NSR-10?	Implicación
Índice de flexibilidad máximo	IF = 2.27	No (límite = 1.0)	Excesiva deformabilidad
Coefficiente de disipación	R = 2.40	< valor teórico (5.0)	Capacidad limitada de absorción de energía
Columnas 30x50 cm	Resistencia 9.3 MPa	No	Incumplen resistencia mínima
Columnas 40x40 cm	Resistencia 15.0 MPa	No	Incumplen resistencia mínima
Columnas circulares 50 cm	Resistencia 14.0 MPa	No	Incumplen resistencia mínima
Condición columna fuerte-viga débil	No cumple	No	Riesgo de mecanismo de colapso no deseado

En la Tabla 12 se listan las irregularidades estructurales identificadas en el sistema de pórticos. Los coeficientes obtenidos reflejan ausencia de redundancia, irregularidad torsional, diafragmas parcialmente flexibles y sistemas no paralelos, condiciones que afectan la distribución de cargas laterales y la respuesta dinámica de la edificación ante eventos sísmicos.

Tabla 12. Irregularidades estructurales

Tipo de irregularidad	Valor/Coeficiente
Ausencia de redundancia	0.75
Irregularidad torsional	0.80
Irregularidad en diafragma	0.80
Sistemas no paralelos	0.80
Geométrica	0.80

La Tabla 13 presenta los resultados principales de la modelación computacional desarrollada en ETABS 21, incluyendo la deriva máxima inter-piso y la relación demanda/capacidad en los elementos críticos. Los valores permiten verificar el cumplimiento de la NSR-10 y evidencian que algunas columnas operan en el límite de su capacidad, lo que justifica la necesidad de un reforzamiento estructural.

Tabla 13. Resultados del modelo estructural

Parámetro	Valor/Estado	Implicación
Deriva máxima (Story2)	0.22%	Cumple límite NSR-10 (1%)
Relación demanda/capacidad (D/C)	0.96	Columna crítica al borde de la capacidad

En la Tabla 14 se sintetizan las deficiencias estructurales más relevantes, su estado actual y el riesgo asociado. Este consolidado facilita priorizar las intervenciones de reforzamiento, enfocándose en mejorar la resistencia a compresión, reducir la excesiva deformabilidad y aumentar la capacidad de disipación de energía de la estructura.

Tabla 14. Principales deficiencias estructurales

Aspecto	Estado	Riesgo asociado
Resistencias a compresión en columnas	<17 MPa (NSR-10)	Fallo por compresión no dúctil
Índice de flexibilidad (IF = 2.27)	>1.0 (límite normativo)	Excesiva deformabilidad sísmica
Coefficiente de disipación (R = 2.40)	<5.0 (valor teórico para pórticos)	Baja capacidad de absorción de energía