PROYECTO DE GRADO



ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES Y CANTIDADES DE MATERIALES ESTRUCTURALES DE EDIFICACIONES DISEÑADAS USANDO EL DOCUMENTO AIS 114 - 17 Y EL REGLAMENTO NSR-10

Presentado por:
Sebastian Zapata Castro - 201928372
Presentado como requisito para optar al título de:
INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
CALI VALLE DEL CAUCA
COLOMBIA
2026

PROYECTO DE GRADO

ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS DE PARÁMETROS ESTRUCTURALES Y CANTIDADES DE MATERIALES ESTRUCTURALES DE EDIFICACIONES DISEÑADAS USANDO EL DOCUMENTO AIS 114 - 17 Y EL REGLAMENTO NSR-10

Presentado por:
Sebastian Zapata Castro

Directores:
Gilberto Areiza Palma, Ingeniero civil, MsC
Carlos Alberto Madera Sierra, Ingeniero civil, PhD

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL - 3747
CALI VALLE DEL CAUCA
COLOMBIA

2026

ÍNDICE

1. Resumen _____ **5**

2. Introducción _____ **6**

3. Planteamiento del problema _____ **8**

4. Objetivos _____ **10**

4.1 Objetivo general

4.2 Objetivos específicos

5. Justificación _____ **11**

6. Marco conceptual _____ **12**

6.1 Antecedentes

6.2 Estado del arte

7. Marco teórico _____ **17**

7.1 Concreto reforzado

7.2 Sistemas estructurales de concreto reforzado

7.3 Diseño sismorresistente

7.4 Diseño sismorresistente basado en desempeño

8. Tipo de investigación _____ **26**

9. Metodología _____ **27**

9.1 Descripción del proyecto

9.2 Modelo computacional

9.3 Procedimiento de modelación estructural en MIDAS GEN

10. Análisis y diseño de la estructura _____ **37**

10.1 Análisis y diseño Mediante NSR-10

10.2 Análisis y diseño mediante AIS 114-17

11. Resultados _____ **50**

11.1 Índices de sobreesfuerzo

11.2 Derivas de piso

11.3 Cantidades de obra

11.4 Análisis no lineal - Pushover

12. Conclusiones _____ 74

13. Bibliografía _____ 76

1. RESUMEN

Este proyecto desarrolla una investigación de tipo predictivo–explicativo con enfoque analítico, orientada a estudiar el comportamiento estructural de una edificación de concreto reforzado diseñada bajo los lineamientos de la NSR-10 y de la AIS 114-17, comparando la resistencia de ambos sistemas estructurales. La investigación integra análisis estructurales lineales y no lineales, incluyendo la aplicación del análisis pushover, con el fin de cuantificar la capacidad resistente, la evolución de la plastificación y el nivel de desempeño alcanzado ante la demanda sísmica considerada.

Palabras clave: *Diseño sismorresistente, concreto reforzado, sistema estructural, AIS 114-17, NSR-10, modelado estructural, rótulas plásticas, análisis pushover.*

ABSTRACT

This project develops predictive-explanatory research with an analytical approach, aimed at studying the structural behavior of a reinforced concrete building designed under the guidelines of NSR-10 and AIS 114-17, comparing the resistance of both structural systems. The research integrates linear and nonlinear structural analyses, including the application of the pushover analysis, in order to quantify the resistance capacity, the evolution of plasticization, and the level of performance achieved under the seismic demand considered.

Keywords: *Earthquake-resistant design, reinforced concrete, structural system, AIS 114-17, NSR-10, structural modeling, plastic hinges, pushover analysis.*

2. INTRODUCCIÓN

Se presenta la comparación en términos tanto de parámetros estructurales como de cantidades de materiales (de estructura) de una edificación de concreto reforzado diseñada usando dos metodologías: (1) la metodología simplificada propuesta en el documento AIS 114-17 "Requisitos Esenciales para Edificaciones de Concreto Reforzado de Tamaño y Altura Limitados", publicado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS y; (2) el Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistentes – NSR-10, Decreto 926 de Marzo 19 de 2010, de uso obligatorio en el país avalado por la Comisión Asesora Permanente (CAP) para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes.

En Colombia, el proceso constructivo de las edificaciones se encuentra regido por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, que especifica cada uno de los aspectos que se deben tener en cuenta para la construcción de todo tipo de estructuras. Sin embargo, en el Artículo C1.1.8 se establece: *se permite utilizar el documento "Requisitos esenciales para edificios de concreto reforzado" desarrollado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica – AIS, el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – Icontec, y el American Concrete Institute – ACI, y publicado bajo la designación ACI IPS-1 en 2002 y por el ACI como ACI 314.1R actualizado recientemente.*

La Norma AIS 114-17 es una actualización y adaptación al medio colombiano del documento IPS-1 "Essential Requirements for Reinforced Concrete Buildings" Publicado por el American Concrete Insitute (ACI) como herramienta de apoyo de diseño estructural en países, zonas o regiones en las que por diversas razones éste no lo realiza un profesional calificado para tal fin. Bajo este precepto es entendible que la metodología propuesta por esta norma lleve implícitos mayores factores de seguridad que se verían reflejados en mayores cantidades de materiales estructurales y por lo tanto mayor costo.

La Norma AIS 114-17 es un documento autónomo que no exige que se realice la modelación de la edificación para verificar el cumplimiento de derivas (índice de flexibilidad) y relaciones demanda/capacidad (índices de sobreesfuerzo, ISE) de los elementos estructurales tal como lo exige el Reglamento NSR-10. Establece una metodología de diseño sísmico simplificado que facilita las labores de diseño de edificaciones de tamaño y altura limitados y para su uso deben cumplirse unos requisitos fundamentales como son: número de pisos, áreas y aspectos geométricos, todos estos descritos en el capítulo 1.3.1 del documento.

En el pasado se han realizado trabajos similares empleando tanto el documento base IPS1 como el anterior código colombiano de diseño y construcción sismo resistente conocido, las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.

El trabajo de grado plantea la realización de las siguientes etapas:

Etapa I: se realizará el diseño estructural de la edificación de acuerdo con los requisitos establecidos en el documento AIS 114-17 la cual culminará con los respectivos planos estructurales y el cómputo de las cantidades requeridas de volúmenes de concreto y pesos de acero de refuerzo. Para efectos de comprobar la seguridad de la estructura se realizará la modelación estructural empleando alguno de los software licenciados que disponga la Universidad del Valle y se calcularán los índices de flexibilidad y de sobreesfuerzo.

Etapa II: se realizará el diseño estructural de la edificación de acuerdo con los requisitos establecidos en el Reglamento NSR.10 culminando igualmente con los respectivos planos estructurales y el cómputo de las cantidades requeridas de volúmenes de concreto y pesos de acero de refuerzo.

Finalmente se hará el análisis comparativo tanto de los parámetros estructurales como de las cantidades de materiales obtenidas como resultados de estos dos diseños de la estructura de la edificación.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el fin de simplificar algunos procesos y cálculos para el diseño estructural, se crean documentos especializados en los diferentes sistemas y elementos estructurales para edificaciones específicas como es el caso de la Norma AIS 114-17. No obstante, estos deben ser evaluados y comparados respecto al reglamento general (NSR-10) para conocer sus similitudes y diferencias que permiten evaluar el desempeño que tiene una estructura con base en ellos.

En Colombia son muchos los factores que afectan la construcción de edificaciones, desde los temas sociales, políticos, ambientales, hasta los técnicos y reglamentarios que respaldan el desempeño y uso adecuado de cada estructura. El inadecuado comportamiento sísmico de las edificaciones diseñadas acorde con los reglamentos de diseño actuales ha generado preocupación en el mundo de la ingeniería civil, ya que algunas estructuras están presentando fallas inesperadas o incluso deterioro importante a tempranas edades.

Es fundamental comprender que las edificaciones no deben ser diseñadas únicamente para evitar el colapso, también deben satisfacer ciertos criterios de habitabilidad y uso. Las metodologías tradicionales de diseño son simples y se centran en la resistencia estructural tal y como se expresa en el documento AIS 114-17, no ofrecen garantía de un adecuado comportamiento de las edificaciones frente a demandas sísmicas. (Hernández, 2021)

Por tales motivos en este trabajo de grado se enfoca en el análisis de dos índices estructurales: (1) la relación demanda/capacidad o índice de sobreesfuerzo de cada elemento que permite predecir la posibilidad de que dicho elemento exceda su capacidad estructural y; (2) el índice de flexibilidad o relación de derivas de piso entre dos niveles consecutivos de la edificación, parámetro que permite medir el grado de afectación que se pueda presentar en elementos no estructurales.

En la Norma AIS 114-17 las cargas laterales actuantes en la edificación, causadas por viento o sismo, son resistidas por los muros de concreto reforzado que forman parte del sistema estructural resistente a cargas laterales. En el Reglamento NSR-10 dichas cargas pueden ser resistidas por pórticos de concreto reforzado y/o por sistemas combinados o duales de pórticos y muros de concreto reforzado.

Para cumplir parcialmente con los requisitos establecidos en el Reglamento NSR-10 es necesario realizar la verificación de las derivas de piso en cada nivel de la edificación: *"Se entiende por deriva el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos de la edificación"*. El Reglamento NSR-10 exige que la deriva resultante, en todo nivel de la edificación, sea menor al 1% de la altura de dicho nivel si se trata de estructuras en concreto y acero y menor a 0.5% de la altura del nivel si es una estructura en mampostería estructural, siendo la deriva de piso uno de los parámetros que mayor influencia tiene en el dimensionamiento de los elementos estructurales.

La deriva elástica depende de tres parámetros básicamente: la carga sísmica, el módulo de elasticidad del concreto, y las dimensiones de los elementos estructurales. Los límites de la deriva garantizan que, frente a un sismo leve (que son muy comunes en Colombia), la

estructura se desplace tan poco, que los elementos no estructurales (muros divisorios, particiones, fachadas, etc.) no sufran daño, gran parte de las pérdidas humanas se deben al movimiento o falla de los elementos no estructurales. (Awad, 2006).

A pesar de que la universidad ya cuenta con una comparación de mencionados índices, existe la necesidad de renovar los resultados, puesto que la investigación fue realizada con versiones anteriores y actualmente los documentos cuentan con diversas actualizaciones, además por ser la AIS 114-17 un documento basado en normativas de otros países, para ser considerado como una alternativa apreciable debe ser evaluado, determinando una compatibilidad en los diseños con lo establecido en el reglamento Colombiano.

Con base en lo expuesto se formula la pregunta de investigación **¿Cuál es el desempeño estructural de una edificación diseñada y construida de acuerdo con los lineamientos de la norma AIS 114 – 17 en comparación con el Reglamento NSR 10?**

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Comparar el nivel de desempeño sísmico de una edificación de tamaño y altura limitada localizada en zona de amenaza sísmica alta (con grado de disipación DES) diseñada de acuerdo con (i) la Norma AIS 114 - 17 y (ii) con el Reglamento NSR 10.

4.2. Objetivos específicos

- Diseñar la estructura por ambas metodologías
- Obtener los parámetros de diseño (Índices de sobreesfuerzo, niveles de rigidez, derivas de piso) de los elementos estructurales diseñados bajo ambas normativas
- Cuantificar las cantidades de materiales en obra (volumen de concreto y kilos de acero de refuerzo) requeridos en cada uno de los diseños para construir la estructura.
- Realizar la comparación de los parámetros estructurales (ISE, rigidez y derivas de piso) y las cantidades de materiales necesarios, siguiendo el procedimiento de diseño de la Norma AIS 114 - 17 y con el Reglamento NSR 10.
- Realizar un análisis estático no lineal tipo pushover a ambas estructuras en términos de capacidad de rotación, con ayuda del software Midas gen

5. JUSTIFICACIÓN

El sector de la construcción en Colombia ha crecido en los últimos años. Su aporte en el crecimiento económico y generación de empleo permite la inversión pública y privada, convirtiéndose en un pilar del desarrollo nacional. (Camacol & Sena, 2015). Es por esto y por la constante actividad sísmica que se pueden generar grandes afectaciones si no se actualizan y se monitorean las técnicas de diseño y construcción, como ocurrió en el sismo de Armenia en 1999 en el que perdieron la vida más de 2000 personas de acuerdo con datos oficiales; por lo tanto, el diseño estructural debe garantizar tanto seguridad, como adecuado comportamiento ante eventos sísmicos.

Se puede incurrir en sobrecostos de diferentes maneras, una es cuando se sobre diseña la estructura, lo que redunda en mayores cantidades de refuerzo y dimensiones excesivas y otra cuando se generan gastos adicionales debidos a deformaciones no previstas, fallas y comportamientos indeseados ante un evento sísmico que, aunque no produzcan un colapso de la estructura si necesitan ser reforzadas para seguir siendo funcionales.

Uno de los factores fundamentales de la normatividad es proteger el colapso de las edificaciones ante eventos sísmicos, evitando con ello la pérdida de vidas humanas. El Reglamento NSR-10 establece requisitos con el propósito de cumplir con los niveles de resistencia requeridos según sus distintos estados de funcionalidad. Sin embargo, no impone la obligación de determinar el comportamiento en el rango inelástico o el mecanismo de falla de las estructuras. Estas consideraciones se abordan como alternativas que quedan a discreción del ingeniero diseñador. (Hernández, 2021).

Para hallar factores que ayuden en el diseño óptimo, primero se debe evaluar el comportamiento de edificaciones de concreto reforzado diseñadas con valores diferentes del coeficiente de disipación de energía o coeficiente ductilidad de la estructura (R) que permite reducir las cargas sísmicas permitiendo que la estructura incursione en el rango inelástico. El valor de R a utilizar depende tanto del sistema estructural como del nivel deseado de disipación de energía (ductilidad).

Este proyecto se genera dada la importancia de evaluar y comparar la eficacia de diferentes normativas de diseño sismo resistente en el contexto colombiano. Un análisis del desempeño permitirá evidenciar la vulnerabilidad sísmica e incertidumbre presente en edificaciones diseñadas bajo la metodología de la Norma AIS 114-17. Además, se espera que los resultados de este trabajo de grado también sean de interés para otros profesionales de la construcción, reguladores y organismos de gestión de riesgos en Colombia, ya que proporciona información valiosa sobre los requisitos de sismo resistencia y las regulaciones apropiadas para garantizar la seguridad y estabilidad de las estructuras en caso de un terremoto.

6. MARCO CONCEPTUAL

6.1. Antecedentes

- Según Álzate y Arenas (2014) cuyo objetivo es **realizar una comparación de la reglamentación de los requisitos esenciales para edificaciones de concreto reforzado (para edificaciones de tamaño y altura limitada basado la Norma ACI 318-02) con respecto al Título C —Concreto Estructural del Reglamento NSR-10** en un edificio de 4 pisos. Este estudio fue pensado en función del sismo que ocurrió en 1999 en la zona del eje cafetero y que afectó a construcciones que no cumplían con la normativa de ese momento, tomando como base el comportamiento sísmico de la región. La investigación es de tipo cualitativa al hacer referencia en el proceso de diseño de la edificación, enfatizando menos en datos cuantitativos. A su vez sirvió para identificar que el Reglamento NSR-10 cumple con los requisitos mínimos para el diseño de elementos de estructuras nuevas y existentes, además la importancia de los lineamientos de apoyo del ACI 318-02 para el uso de materiales cementantes; sin embargo, se especifica que este último está pensado para las construcciones nuevas con ciertas restricciones.

Finalmente se hace la verificación y chequeo del comportamiento de los elementos estructurales por cada documento y la comparación entre la determinación de derivas que para el ACI 318-02 se utilizaron las fórmulas de wilbur, obteniendo por este método un valor mayor.

- Según Cubillos (2021) cuyo objetivo se centra en las **implicaciones económicas que genera el uso de aceros de alta resistencia incluidos en la actualización de la Norma ACI 318-19 con respecto a las disposiciones del Reglamento NSR-10.** Se realiza el diseño de una estructura aporticada de 3 niveles en donde se utiliza el acero de 690MPa, además se modela la edificación con ayuda del software especializado Etabs. La Norma ACI 318-19 realiza la modificación para el acero de 690MPa permitiendo su uso en aplicaciones de flexión, fuerza axial, retracción, temperatura y apoyo lateral de barras longitudinales para sistemas sísmicos especiales, además hace el reemplazo por el acero de 700 MPa que se tenía anteriormente para sistemas especiales y espirales, con usos de apoyo lateral de barras longitudinales. Con base en la investigación se indica que el uso del acero de alta resistencia (690Mpa) permite reducir el peso total del refuerzo longitudinal usado a tracción normalmente de 420Mpa en un 30%, dado que el área mínima de acero (As) disminuyo al tener una mayor resistencia lo que implica menores costos y menor tiempo de armado, sin embargo la longitud de desarrollo que requiere el acero de 690Mpa aumentó de manera exponencial con respecto al de menor resistencia.

Finalmente debido a la actualización reciente la Norma ACI 318 19 realiza más detalladamente las resistencias mínimas para elementos estructurales en la tabla 19.2.1.1 en función de la resistencia del acero, nivel de riesgo y elementos estructurales, lo cual no está contemplado en la NSR10.

- Según Choque y Huanca (2022) cuyo objetivo de investigación consiste en **determinar el desempeño sísmico del Análisis estático no lineal Incorporado al Sector B del Colegio**

Especial Hellen Keller en Ventanilla- Callao, además, **determinar el desempeño sísmico en relación a la rigidez lateral de la estructura, a la ductilidad y resistencia** en donde se plantea la hipótesis de que el desempeño sísmico del colegio es adecuado y cumple con las normas del país (Perú). El método de este trabajo de investigación es en campo y de observación indirecta, ya que los datos son recolectados a través de libros, revistas y estudios. Inicialmente se modela la estructura con ayuda del software Etabs que ayuda a extraer la información necesaria para el diseño de mampostería restringida de la estructura y realizar gráficos correspondientes a de fuerzas internas, gráficas de pseudo-aceleración para análisis sísmico, etc. Los resultados obtenidos con respecto a las fuerzas laterales proponen un ajuste a 0,0694 % de deriva en la dirección "X", menos de 7/1000 para miembros de hormigón armado, y 0,0347 % de deriva en la dirección "Y", que es menos de 5/1000 especificado por la Norma E 030.

La investigación concluyó que el análisis estático no lineal y el comportamiento sísmico relacionado con la ductilidad garantiza la creación de rótulas en la viga para aceptar mayores deformaciones en el rango inelástico.

- Según Pardo y Valero (2016) cuyo objetivo consiste en **comparar los diseños estructurales obtenidos entre la "NSR-10 siendo este un diseño complejo y "Los requisitos esenciales para edificios de concreto reforzado (Para edificaciones de tamaño y altura limitados basado en ACI 318-02)"** para un diseño simplificado analizando las ventajas y desventajas de cada alternativa. El análisis se realiza con ayuda del software especializado Etabs. Se realiza una síntesis de las diferencias relevantes que encontraron en cada uno de los elementos estructurales, apoyándose en los resultados obtenidos con cada método de diseño utilizado, adicionalmente se verifica las diferencias en los comportamientos a tracción, compresión, cortante y rigidez de los diferentes elementos.

Esta investigación sirvió para determinar la disminución de elementos estructurales como muros pantalla en el proyecto diseñado con la normativa NSR-10 con respecto al ACI 318-02, verificando que no afecta la integridad de la estructura; otro aspecto relevante que encontraron en el diseño de la edificación, fue el aumento en las secciones de las zapatas diseñadas, pues al utilizar los requisitos del ACI 318-02 las cargas axiales que distribuyen las columnas a las zapatas, aumentaron en un 46% aproximadamente; finalmente otro de los puntos interesantes que encontraron fue la disminución del peso de la edificación optimizando y reduciendo en un 22% aproximadamente las cargas y volúmenes de concreto.

6.2. Estado del arte

Los métodos de diseño sísmico de estructuras convencionales se basan en caracterizar una demanda sísmica mediante fuerzas, es decir, las fuerzas y desplazamientos debido a un evento sísmico se calculan con un método elástico y cuyas fuerzas combinadas obtenidas se utilizan para diseñar las secciones de elementos, el uso de factores de reducción de capacidad que pretende describir las deformaciones inelásticas y ductilidad de los elementos dentro de un sistema estructural son parte de las característica principales de este método. (Hernández, 2021)

No obstante, el uso de un mismo factor de reducción para diferentes sistemas estructurales supone que ante una misma demanda sísmica se presentaría igual comportamiento inelástico lo cual no es cierto, adicionalmente la distribución de fuerzas a través de la edificación ante eventos sísmicos no podría definirse a través de una fuerza cortante de diseño en la base (Priestley, 2000).

El diseño sismo resistente en Colombia ha sido una preocupación constante debido a la alta sismicidad del territorio y la necesidad de garantizar la seguridad de las edificaciones frente a posibles eventos sísmicos. A lo largo de las últimas décadas, se han realizado esfuerzos significativos para desarrollar normas y regulaciones que guíen el diseño y la construcción de estructuras capaces de resistir los efectos de los sismos.

El país hizo un experimento hace algunos años de generar un código de construcción en concreto reforzado para edificios hasta de cinco pisos denominado IPS-1, intentando reducir la complejidad que implica la extensión total del Reglamento colombiano para un tipo de estructuras que comprende un alto porcentaje de las edificaciones construidas. el cual se volvió el documento que más vendió el American Concrete Institute (ACI), en su traducción al inglés, en el 2002. (García, 2014)

Ante el éxito del documento IPS-1 y por sugerencia de la Portland Cement Association – PCA, el ACI en 2004 crea un nuevo comité al que denomina: ACI 314 – Simplified Design of Concrete Buildings cuya misión es "Desarrollar e informar acerca del diseño simplificado y la construcción económica de edificaciones de concreto de altura limitada".

A finales del 2011 se hace la publicación del documento nombrado ACI 314RS-11 en su versión en español que sería la actualización del IPS-1. En el 2016 este documento recibe un ajuste en donde las principales novedades serían: Los muros de núcleo de ascensores y escaleras, la simplificación de la resistencia a flexión de vigas y la modificación a la cantidad mínima de muros estructurales. Haciendo de este documento la base para que la AIS creara el AIS114-17.

La primera norma de sismo resistencia colombiana se expidió por medio del Decreto 1400 de 1984. Este fue un decreto de facultades extraordinarias, expedido al amparo de la Ley 11 de 1983 que hablaba sobre la reconstrucción de Popayán; duró vigente 14 años. Después, fue aprobada por el Congreso de la República la Ley 400 de 1997, al amparo de la cual se expidieron los Reglamentos de Construcción Sismo Resistente NSR-98 (1998), que sustituyó

al Código de 1984, y la actualización expedida en el 2010 como Reglamento NSR-10, hoy vigente.

El Reglamento NSR-10 actualizó todos los temas incluidos en la NSR-98 y se añadieron algunos nuevos. No hubo modificaciones en la ecuación del cálculo del cortante sísmico ni en el cálculo y límite de deriva de piso, los principales cambios se vieron reflejados en la clasificación de los tipos de suelo (A B C D E y F). Para la consideración de los efectos de sitio se incluyó el parámetro "Fv" y "Fa" que amplifica las ordenadas del espectro en periodos largos y períodos cortos respectivamente, estos dependiendo de los valores "Aa" y "Av" que pueden ser máximo 0.5 g y mínimo 0.05g.

En 1974 se funda en la Universidad de los Andes la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) que Por resolución número 3426 del 29 de Julio de 1976, otorgada por el Ministerio de Justicia y del Derecho, publicada en el Diario oficial No. 34663 del 27 de octubre del mismo año, se reconoció Personería Jurídica a la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. El AIS realizó aportes significativos a la ingeniería sísmica colombiana, como la traducción y distribución en español de códigos sismo resistentes internacionales que permitieron la adaptación a la reglamentación colombiana múltiples criterios técnicos en los procesos de evaluación y rehabilitación de estructuras como son la definición de fases para el proceso constructivo o los niveles de daño para la ocupación, prevención o desalojo de una estructura. (Quinatoa, 2022).

En la ingeniería sismorresistente moderna, la evaluación del comportamiento estructural ha evolucionado desde metodologías basadas exclusivamente en fuerzas hacia enfoques orientados al desempeño. Los procedimientos tradicionales de análisis lineal permiten estimar adecuadamente la estabilidad global de una edificación frente a cargas sísmicas de diseño; sin embargo, presentan limitaciones para representar el comportamiento real de la estructura una vez se supera el rango elástico, etapa en la cual ocurren los daños estructurales más significativos.

En 1994 en el terremoto de Northridge se evidenció importantes limitaciones de esta filosofía de diseño: numerosas edificaciones cumplieron el objetivo de evitar el colapso, pero presentaron daños severos que las hicieron económicamente irreparables o inutilizables. A partir de este evento surgió la necesidad de desarrollar metodologías que permitieran predecir no solo la estabilidad estructural, sino también el desempeño esperado frente a diferentes niveles de amenaza sísmica.

Como respuesta, el comité Vision 2000 propuso una nueva filosofía denominada Diseño Basado en Desempeño (Performance-Based Design, PBD), en la cual el comportamiento estructural se evalúa en función de objetivos medibles relacionados con la seguridad de la vida, la funcionalidad, el costo de reparación y la continuidad de operación de la edificación.

Estos conceptos fueron formalizados en documentos como ATC-40 y FEMA-356, los cuales introdujeron procedimientos simplificados de análisis estático no lineal (pushover) para estimar la capacidad inelástica de las estructuras. Dichos métodos permiten relacionar la demanda sísmica con la capacidad resistente mediante curvas de capacidad y niveles de

desempeño, constituyendo un avance significativo frente al análisis lineal tradicional basado únicamente en reducción de fuerzas.

En consecuencia, el análisis no lineal pasó a convertirse en una herramienta fundamental para evaluar la respuesta real de las estructuras ante sismos severos, permitiendo estimar deformaciones, estados de daño esperados, mediante la formación de rotulas plásticas, aspectos esenciales en estudios comparativos de desempeño estructural.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Concreto reforzado

El concreto reforzado es un material compuesto ampliamente utilizado en la construcción de edificaciones debido a su alta resistencia a la compresión y al aporte de resistencia a tracción proporcionado por el acero de refuerzo. Su comportamiento estructural depende de parámetros como la resistencia a compresión (f'c), la fluencia y ductilidad del acero, las condiciones de confinamiento y las relaciones de compatibilidad entre deformaciones. Para efectos del diseño sismorresistente, la ductilidad y la capacidad de disipación de energía son características fundamentales, especialmente en regiones de amenaza sísmica alta.

Históricamente, el acero ha sido el refuerzo predominante en las estructuras de concreto debido a sus propiedades mecánicas favorables. No obstante, en los últimos años se han incorporado diversos materiales compuestos como fibras de carbono y otros polímeros reforzados que se utilizan como alternativas al acero en ciertas aplicaciones, ofreciendo ventajas como resistencia a la corrosión y menor peso.

La NSR-10, en concordancia con el ACI 318, establece requisitos específicos para garantizar la resistencia mínima, relaciones de cuantías, confinamiento del núcleo y diseño por capacidad. La Norma AIS 114-17 aborda el uso del concreto estructural desde un enfoque complementario, enfatizando la correcta selección de propiedades mecánicas, la consistencia en el detallado del refuerzo, el control de la rigidez del material y la limitación de deformaciones globales de la estructura. Este enfoque busca asegurar un desempeño sísmico adecuado del concreto reforzado mediante criterios prescriptivos y de control elástico.

7.2. Sistemas estructurales de concreto reforzado

Un sistema estructural es el conjunto de elementos que resisten las cargas gravitacionales y laterales que actúan sobre una edificación. Entre los sistemas estructurales más utilizados para edificaciones en zonas sísmicas se encuentran:

- **Pórticos resistentes a momento**

  En este sistema, tanto las cargas verticales como las fuerzas laterales son atendidas por un pórtico espacial sin diagonales, compuesto por vigas y columnas conectadas rígidamente. Todo el comportamiento depende de la acción conjunta de estos elementos, que aportan rigidez flexional y capacidad para soportar momentos y fuerzas de cortante.

  Este sistema se caracteriza por su alta capacidad de disipación de energía, favoreciendo la formación controlada de rótulas plásticas en vigas, lo cual contribuye a un comportamiento sísmico estable. Adicionalmente cuenta con una alta flexibilidad arquitectónica, al no requerir elementos estructurales adicionales como muros o

diagonales, permite una mayor libertad en la distribución de espacios y en el diseño de fachadas.

No obstante, en comparación con sistemas que incorporan muros estructurales, los pórticos resistentes a momento presentan una menor rigidez lateral, lo que puede dar lugar a mayores derivas, especialmente en edificaciones de mediana y gran altura, limitando su eficiencia estructural en zonas de alta sismicidad.



Figura 1. Sistema Aporticado

- **Muros estructurales**

En este sistema, tanto las cargas verticales como las fuerzas laterales son atendidas por los diferentes muros de carga que se encuentran distribuidos en ambos sentidos de la estructura aportando una gran rigidez lateral.

Una de las principales ventajas de este sistema es su elevada rigidez lateral, lo que permite reducir significativamente los desplazamientos y derivas frente a acciones sísmicas, especialmente en edificaciones de mediana y gran altura o ubicadas en zonas de alta amenaza sísmica. Asimismo, la presencia de muros estructurales mejora el desempeño global de la edificación, al limitar concentraciones excesivas de daño en los elementos del sistema resistente y proporcionar una respuesta más estable ante sismos severos.

El uso de muros estructurales implica mayor atención a la ubicación de los elementos, una mala distribución en planta o en altura puede generar efectos torsionales significativos, incrementando las demandas en algunos muros y elementos adyacentes. El diseño y detallado de los muros requiere especial atención para garantizar un comportamiento dúctil, especialmente en zonas críticas como las regiones de borde y las zonas de confinamiento. También aparecen limitaciones arquitectónicas, ya que estos elementos suelen condicionar la distribución de espacios, vanos y fachadas.



Figura 2. Sistema de muros estructurales.

- **Sistemas duales**

En este sistema, las cargas verticales son soportadas por un pórtico espacial resistente a momentos, mientras que las cargas horizontales deben ser atendidas de manera conjunta donde los muros o pórtico arriostrado que represente mínimo el 75% de la resistencia.

- **Sistemas combinados**

En este sistema, los pórticos se destinan únicamente a soportar las cargas verticales, mientras que la resistencia a las fuerzas laterales se confía a muros estructurales.

Este sistema permite aprovechar la rigidez lateral aportada por los muros y la ductilidad propia de los pórticos, logrando un balance adecuado entre resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía. No obstante, en los sistemas estructurales combinados la dificultad radica en lograr una adecuada compatibilidad y balance de rigideces entre muros y pórticos. Una distribución inadecuada de los muros puede provocar que estos concentren la mayor parte de las fuerzas laterales, generando efectos torsionales y una subutilización de los pórticos



Figura 3. Sistema combinado.

La NSR-10 clasifica los sistemas según su capacidad de disipación de energía (DMO, DES y DMI), asociando restricciones y requisitos mínimos de detallado para garantizar un comportamiento estable durante eventos sísmicos. La AIS 114-17 se especializa en el uso de muros estructurales, definiendo la respuesta esperada frente a deformaciones inelásticas y mecanismos de falla permitidos.

7.3. Diseño sismorresistente

El diseño sismorresistente tiene como propósito garantizar la seguridad de los ocupantes mediante el control del daño estructural durante un evento sísmico. En Colombia, el diseño está regido por:

- **NSR-10**, aplicable a todas las edificaciones.
- **AIS 114-17**, aplicable específicamente a muros estructurales de concreto.

  Corresponde a una guía técnica para el diseño simplificado de edificaciones de concreto reforzado, aplicable principalmente a estructuras de baja altura, regulares en planta y en altura. Su procedimiento se basa en un análisis elástico mediante fuerzas horizontales equivalentes, sin requerir análisis dinámicos o no lineales. Se recomienda su uso en proyectos de baja complejidad estructural, así como en etapas de diseño preliminar, verificación simplificada o diseños con rapidez.

El enfoque actual del diseño se basa en el concepto de diseño por capacidad, este implica que ciertos elementos y conexiones se diseñan con resistencias superiores a las que indican las combinaciones de carga elásticas, especialmente para garantizar un adecuado comportamiento en cortante, compresión y flexión. La aplicación de este concepto se refleja en requisitos de confinamiento, cuantías mínimas, amplificación de cortantes y en la necesidad de que la estructura mantenga su capacidad resistente aún bajo demandas sísmicas elevadas

7.4. Diseño sismorresistente basado en desempeño

El diseño por desempeño parte de un principio esencial, no todos los sismos son iguales y no todas las estructuras deben responder igual ante ellos. Por tanto, su filosofía reconoce que existen diferentes niveles de amenaza sísmica (frecuente, ocasional, rara y muy rara) y, a su vez, diferentes niveles de desempeño esperados por parte de la estructura (ocupación inmediata, seguridad de vida, prevención de colapso, colapso). La capacidad estructural depende de la resistencia y deformación máxima de los componentes del sistema de resistencia sísmico. Para determinar sus capacidades más allá del límite elástico, es necesario utilizar algún procedimiento de análisis no lineal, como, por ejemplo, el análisis estático no lineal (pushover).

La transición hacia el comportamiento inelástico ocurre cuando el esfuerzo alcanza el límite elástico del material, punto conocido como fluencia. A partir de este estado, el material continúa deformándose sin un incremento proporcional del esfuerzo, desarrollando deformaciones permanentes. En el caso del acero de refuerzo, esta etapa suele manifestarse como una meseta de fluencia relativamente definida, seguida posteriormente por una fase de endurecimiento por deformación hasta alcanzar la resistencia última.

En el concreto, el comportamiento es diferente, la respuesta esfuerzo–deformación es no lineal desde etapas tempranas, alcanzando un esfuerzo máximo asociado a una deformación específica, tras lo cual se produce un ablandamiento progresivo hasta la falla por aplastamiento. Esta diferencia en el comportamiento de ambos materiales condiciona el desempeño global de los elementos de concreto reforzado.

En términos estructurales, la plastificación de un elemento no implica una falla inmediata, sino la formación de zonas localizadas donde las deformaciones se concentran una vez alcanzada la fluencia del acero o el estado límite del concreto. Estas zonas se idealizan en el análisis no lineal mediante rótulas plásticas, que representan de manera concentrada la capacidad de rotación inelástica del elemento.



Figura 4a. Curva esfuerzo-deformación del concreto.

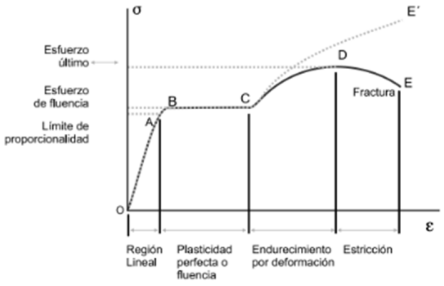


Figura 4b. Curva esfuerzo-deformación del acero.

La respuesta inelástica de las estructuras de concreto armado bajo cargas sísmicas es caracterizada mediante la disminución de la rigidez y deformaciones permanentes en los elementos involucrados. El diseño por desempeño incorpora niveles de desempeño estructural y los asocia a niveles de amenaza sísmica, lo que permite una matriz de diseño multifactorial

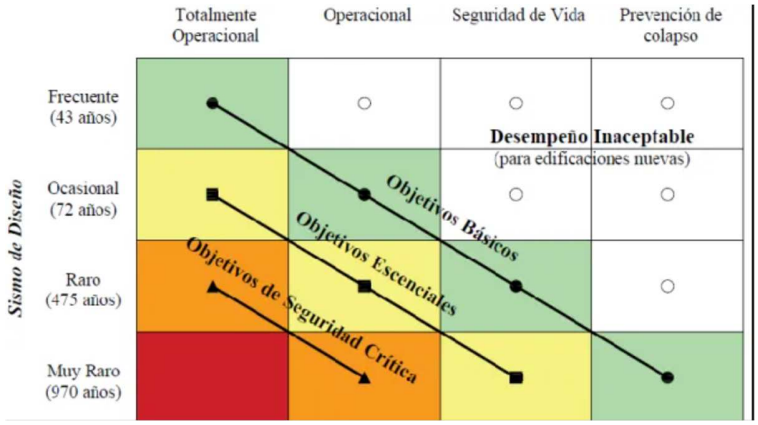


Figura 5. Niveles de desempeño sísmico.

El nivel de desempeño sísmico de una estructura se define de acuerdo con criterios de qué tanto daño se permitirá dependiendo del tipo de uso y la funcionalidad que tendrá luego del sismo.

- **Ocupación Inmediata/operacional (IO):** Daño estructural leve tras un sismo. La estructura mantiene su resistencia y rigidez, permitiendo reparaciones menores para su uso. El riesgo de lesiones graves es bajo.
- **Seguridad de Vida (LS):** Daños significativos, pero sin riesgo de colapso. Las reparaciones son posibles, aunque podrían no ser rentables. Podrían ocurrir lesiones, pero con baja probabilidad de muertes.
- **Prevención del Colapso (CP):** Daños severos que reducen la rigidez y resistencia, aunque la estructura soporta cargas gravitacionales. Las reparaciones son improbables y no son seguras para la ocupación, con alto riesgo de colapso ante replicas y probabilidad de lesiones.

Los niveles de desempeño descritos anteriormente se asocian a estados específicos de daño estructural y a límites de deformación admisibles en los elementos. Para poder evaluar cuantitativamente dichos estados dentro del modelo numérico, es necesario incorporar un mecanismo que represente la capacidad de deformación inelástica de los elementos. Este mecanismo se modela mediante rótulas plásticas, las cuales permiten relacionar los límites de desempeño establecidos por FEMA con parámetros mecánicos medibles, como la rotación en los extremos de los elementos.

Las rótulas plásticas se definen para los momentos flectores alrededor del eje principal de los elementos, de acuerdo con los parámetros y estados límite establecidos en los lineamientos de FEMA. Permitiendo la construcción de la curva de capacidad, la cual relaciona el cortante basal con el desplazamiento del nodo de control. A partir de dicha curva, se analiza la evolución del daño estructural, la secuencia de plastificación de los elementos y el nivel de desempeño alcanzado por la estructura frente a la demanda sísmica considerada.

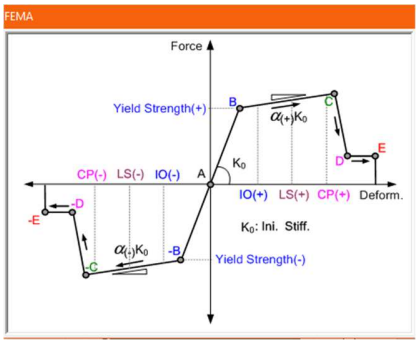


Figura 6a. Esquema de curva de capacidad.

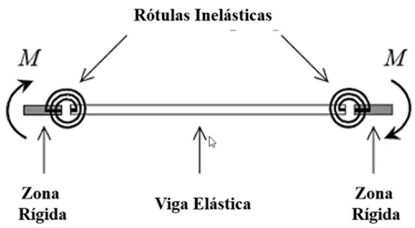


Figura 6b. modelo de rótulas plásticas concentradas

La Figura muestra el tipo de curva fuerza–deformación que se obtiene al ejecutar el análisis no lineal (pushover) del modelo estructural. Esta curva representa el comportamiento no lineal de los elementos mediante rótulas plásticas definidas conforme a los lineamientos FEMA, incluyendo la etapa elástica inicial, la fluencia, el desarrollo del comportamiento inelástico y la degradación de resistencia hasta los estados de Seguridad de Vida y Prevención de Colapso. Este tipo de respuesta es la que se espera observar durante la ejecución del modelo no lineal, y sirve como base para la interpretación del desempeño estructural.

Para la construcción de la curva de capacidad se asignaron rótulas plásticas concentradas de acuerdo con los lineamientos de FEMA y ASCE, las cuales se definen mediante relaciones momento-rotación (M-ϕ). La formulación se representa insertando resortes de traslación y rotación inelásticos de longitudes cero adimensionales, que pueden deformarse plásticamente en el elemento. Las partes restantes distintas de las fluencias inelásticas se modelan como un elemento elástico.

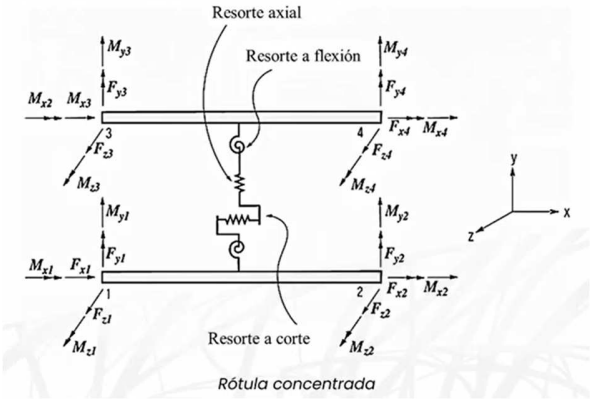


Figura 7. Esquema de rótula concentrada

En este modelo, la no linealidad del elemento no se distribuye a lo largo de toda la viga o columna, sino que se concentra en sus extremos mediante resortes inelásticos. Estos resortes representan la zona real donde ocurre la fisuración, fluencia del acero y aplastamiento del concreto durante la respuesta sísmica. En términos físicos, el elemento estructural permanece mayoritariamente elástico (zona central), mientras que las deformaciones inelásticas se concentran en pequeñas longitudes cercanas a los apoyos denominadas longitudes de rótula plástica.

A partir de la rotación de fluencia y la rotación última, FEMA establece fracciones de la deformación plástica disponible para definir los estados IO, LS y CP. El programa MIDAS Gen adopta estos criterios para asignar automáticamente los puntos característicos de la rótula plástica en la relación momento–rotación.

Los parámetros esenciales que se tienen en cuenta al momento de calcular la rotación de la estructura son:

- La rotación de fluencia corresponde al punto en el cual el elemento pasa del comportamiento elástico al inelástico y se obtiene a partir de la pendiente inicial de la relación momento-rotación:

$$\phi_y = \frac{M_y}{K_i}$$

donde $M_y$es el momento de fluencia esperado de la sección y $K_i$la rigidez efectiva inicial del elemento. Para vigas de concreto reforzado con extremos restringidos, FEMA establece que la rigidez debe calcularse considerando una inercia efectiva reducida:

$$K_i = \frac{6EI_e}{L}$$

siendo $I_e = 0.5I_g$, con el fin de representar el agrietamiento del concreto en el rango previo a la fluencia.

- Posteriormente se verifican las condiciones de confinamiento del refuerzo transversal para determinar el tipo de comportamiento del elemento. De acuerdo con FEMA, un elemento se clasifica como conforme (tipo C) cuando:

$$s_v < \frac{d}{3} V_s \geq 0.75V$$

donde $s_v$es la separación de estribos, $d$la altura efectiva de la sección, Vel cortante y $V_s$la resistencia aportada por el refuerzo transversal.

- Para la determinación de los límites de rotación plástica establecidos en FEMA es necesario evaluar la ductilidad de la sección, la cual depende de la relación entre la cuantía de refuerzo longitudinal y la cuantía balanceada.

  La cuantía balanceada corresponde al estado en el cual el concreto alcanza su deformación última simultáneamente con la fluencia del acero, y se calcula mediante:

$$\rho_b = \frac{0.85\,\beta_1 f_c'}{f_y} \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{t,min}}$$

- Posteriormente se determina la relación:

$$\frac{\rho - \rho'}{\rho_b}$$

la cual permite identificar el nivel de ductilidad de la sección. Este parámetro, junto con las condiciones de confinamiento del refuerzo transversal, permite ingresar por ejemplo a la Tabla 6-7 del FEMA para obtener las rotaciones plásticas de las vigas de concreto correspondientes a los niveles de desempeño Ocupación Inmediata (IO), Seguridad de Vida (LS) y Prevención de Colapso (CP), a su vez se realiza un proceso similar para obtener las rotaciones plásticas de las columnas.

Table 6-7 *Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures—Reinforced Concrete Beams*

Conditions			Modeling Parameters[3]			Acceptance Criteria[3]				
			Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians				
						Performance Level				
							Component Type			
							Primary		Secondary	
			a	b	c	IO	LS	CP	LS	CP
i. Beams controlled by flexure[4]										
$\frac{\rho-\rho'}{\rho_{bal}}$	Trans. Reinf.[2]	$\frac{V}{b_w d\sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.0	C	≤ 3	0.025	0.05	0.2	0.010	0.02	0.025	0.02	0.05
≤ 0.0	C	≥ 6	0.02	0.04	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.04
≥ 0.5	C	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≥ 0.5	C	≥ 6	0.015	0.02	0.2	0.005	0.005	0.015	0.015	0.02
≤ 0.0	NC	≤ 3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.01	0.02	0.02	0.03
≤ 0.0	NC	≥ 6	0.01	0.015	0.2	0.0015	0.005	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≤ 3	0.01	0.015	0.2	0.005	0.01	0.01	0.01	0.015
≥ 0.5	NC	≥ 6	0.005	0.01	0.2	0.0015	0.005	0.005	0.005	0.01

Table 6-8 Modeling Parameters and Numerical Acceptance Criteria for Nonlinear Procedures-Reinforced Concrete Columns

Conditions			Modeling Parameters			Acceptance Criteria				
			Plastic Rotation Angle, radians		Residual Strength Ratio	Plastic Rotation Angle, radians				
						Performance level				
							Component Type			
						IO	Primary		Secondary	
			a	b	c		LS	CP	LS	CP
i Columns controlled by flexure[1]										
$\frac{P}{A_g f'_c}$	Trans Reinf.	$\frac{V}{b_w d\sqrt{f'_c}}$								
≤ 0.1	C	≤3	0.02	0.03	0.2	0.005	0.0015	0.02	0.02	0.03
≤ 0.1	C	≥ 6	0.016	0.024	0.2	0.005	0.012	0.016	0.016	0.024
≥ 0.4	C	≤ 3	0.015	0.025	0.2	0.003	0.012	0.015	0.018	0.025
≥ 0.4	C	≥ 6	0.012	0.02	0.2	0.003	0.01	0.012	0.013	0.02
≤ 0.1	NC	≤ 3	0.006	0.015	0.2	0.005	0.005	0.006	0.01	0.015
≤0.1	NC	≥ 6	0.005	0.012	0.2	0.005	0.004	0.005	0.008	0.012
≥ 0.4	NC	≤ 3	0.003	0.01	0.2	0.002	0.002	0.003	0.006	0.01
≥ 0.4	NC	≥ 6	0.002	0.008	0.2	0.002	0.002	0.002	0.005	0.008

Tabla 1. FEMA 356 Criterios de aceptación en rótulas plásticas para vigas y columnas

A partir de la rotación de fluencia obtenida y de las rotaciones plásticas límites, establecidas por FEMA, el programa define la relación momento-rotación mediante cinco puntos característicos A-B-C-D-E.

El punto B corresponde al inicio de la fluencia de la sección y está definido por el momento nominal resistente y la rotación de fluencia.

Las rotaciones asociadas a los diferentes niveles de desempeño se obtienen mediante la suma de la rotación elástica y las rotaciones plásticas establecidas por FEMA:

$$\theta = \theta_y + \theta_p$$

donde $\theta_p$corresponde a los estados de desempeño Inmediata Ocupación (IO), Seguridad de Vida (LS) y Prevención de Colapso (CP).

Para los estados IO y LS se asume que el elemento desarrolla un comportamiento plástico estable, manteniendo aproximadamente constante su capacidad resistente igual al momento nominal. No obstante, al alcanzarse el estado de Prevención de Colapso (CP), se considera la degradación de la resistencia de la sección estructural como consecuencia del daño acumulado en el concreto, la fisuración extensiva y la posible inestabilidad del refuerzo longitudinal. Por tal motivo, el momento resistente se reduce a una fracción del momento nominal (αM_n), representando la pérdida progresiva de capacidad posterior al daño severo.

En consecuencia, la rótula plástica definida no solo contempla el incremento de rotación asociado al comportamiento inelástico, sino también la disminución de la resistencia del elemento en la etapa previa al colapso.

8. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se define como una investigación predictivo-explicativa. La investigación predictiva tiene como propósito prever o anticipar situaciones futuras, requiere de la exploración, descripción, comparación, el análisis y la explicación. La investigación tipo pronóstico es aquella en la cual el propósito principal es "predecir" la dirección futura de los eventos investigados. (Whitney, 1970). En este caso ya se conocen diferentes tipos de estructuras construidas bajo los lineamientos de ambas normativas por lo cual se tiene una idea de los resultados que debe arrojar la investigación, con base en ello pasamos al tipo de investigación explicativa con una metodología que busca responder cómo y por qué se produce un determinado fenómeno. Conocer las causas de un hecho es crucial para abordar su estudio e investigación. En otras palabras, permite sostener las bases para sustentar una hipótesis. Este tipo de investigación es aquella que busca comprender las relaciones entre distintos eventos, se interesa fundamentalmente por el "porqué", y el "cómo", de los fenómenos.

Según el tipo de datos que se manejan en la investigación que son cuantitativos, se suelen emplear métodos relacionados con la estadística, las matemáticas y la informática con el objetivo de medir variables. En este caso todos estos métodos se verán combinados con ayuda del software en el cual se esculpió la estructura con un modelo analítico que permitirá diferentes tipos de análisis modales-espectrales que permiten conocer el desempeño de la misma.

Al combinar ambos enfoques, una investigación predictivo-explicativa logra comprender el porqué de un fenómeno y ser capaz de visualizar su comportamiento futuro. Algunos de los motivos para realizar una investigación de este tipo son la identificación de riesgos y la mejora de la eficiencia que juntos podrían optimizar el funcionamiento de la estructura además de evaluar las medidas que deben tomarse frente a los puntos críticos del análisis sísmico.

9. METODOLOGÍA

Con el propósito de desarrollar la investigación de manera rigurosa y garantizar el cumplimiento de los objetivos planteados, se establece la siguiente metodología de trabajo.

De manera preliminar, se selecciona una edificación que cumpla con las disposiciones de aplicabilidad y restricciones establecidas en el documento AIS 114-17 para edificaciones de concreto reforzado de tamaño y altura limitadas. La estructura se considera ubicada en una zona de amenaza sísmica alta y se diseña para cumplir los requisitos correspondientes a sistemas estructurales con capacidad especial de disipación de energía (DES). Esta selección permite evaluar la aplicabilidad y el alcance de las metodologías de diseño dentro de un contexto normativo exigente en términos de desempeño sísmico.

Inicialmente, se desarrolla el diseño estructural de los elementos conforme a la metodología establecida en la NSR-10. desarrollando un modelo computacional detallado que permita el cumplimiento integral de los requisitos reglamentarios. En este caso se verifican los índices de sobreesfuerzo y de flexibilidad de la estructura, garantizando consistencia en los criterios de evaluación entre ambas metodologías. Asimismo, se elaboran los planos de despiece estructural que posibilitan una cuantificación precisa de los materiales requeridos.

Posteriormente, se realiza el diseño estructural de la misma edificación conforme a los lineamientos establecidos en la AIS 114-17, En esta fase también se realiza la verificación de los índices de sobreesfuerzo (ISE) de cada elemento estructural y, aunque la norma no lo exige de manera explícita, se evalúan adicionalmente los índices de flexibilidad (IFL) por nivel, con el fin de incorporar un criterio complementario de control del desempeño global de la edificación. El comportamiento sísmico se estudia mediante análisis lineales, bajo el supuesto de proporcionalidad entre las magnitudes físicas involucradas, lo cual permite la aplicación de los procedimientos simplificados contemplados en dicha norma. Estos análisis permiten verificar la seguridad y confiabilidad estructural frente a las solicitaciones sísmicas de diseño.

Para ambos diseños se efectúa el cómputo de las cantidades de materiales estructurales, con el fin de establecer un criterio comparativo en términos de consumo y posible optimización. De manera complementaria, en los dos casos se desarrolla un análisis no lineal estático tipo pushover, orientado a evaluar el desempeño sísmico global de la estructura, identificar la secuencia de formación de rótulas plásticas y estimar su capacidad de deformación ante incrementos progresivos de carga lateral. Este análisis permite contrastar los resultados obtenidos mediante procedimientos lineales y valorar el nivel de desempeño alcanzado bajo cada enfoque normativo.

Finalmente, se realiza una comparación integral de los resultados obtenidos mediante ambas metodologías de diseño, considerando los valores de los índices calculados, el desempeño estructural derivado del análisis pushover y las cantidades de materiales requeridas. A partir de esta comparación se valida el comportamiento estructural de la edificación, se evalúa la eficiencia de cada procedimiento de diseño y se determina cuál metodología ofrece mayor optimización de materiales, manteniendo condiciones adecuadas de seguridad y confiabilidad estructural.

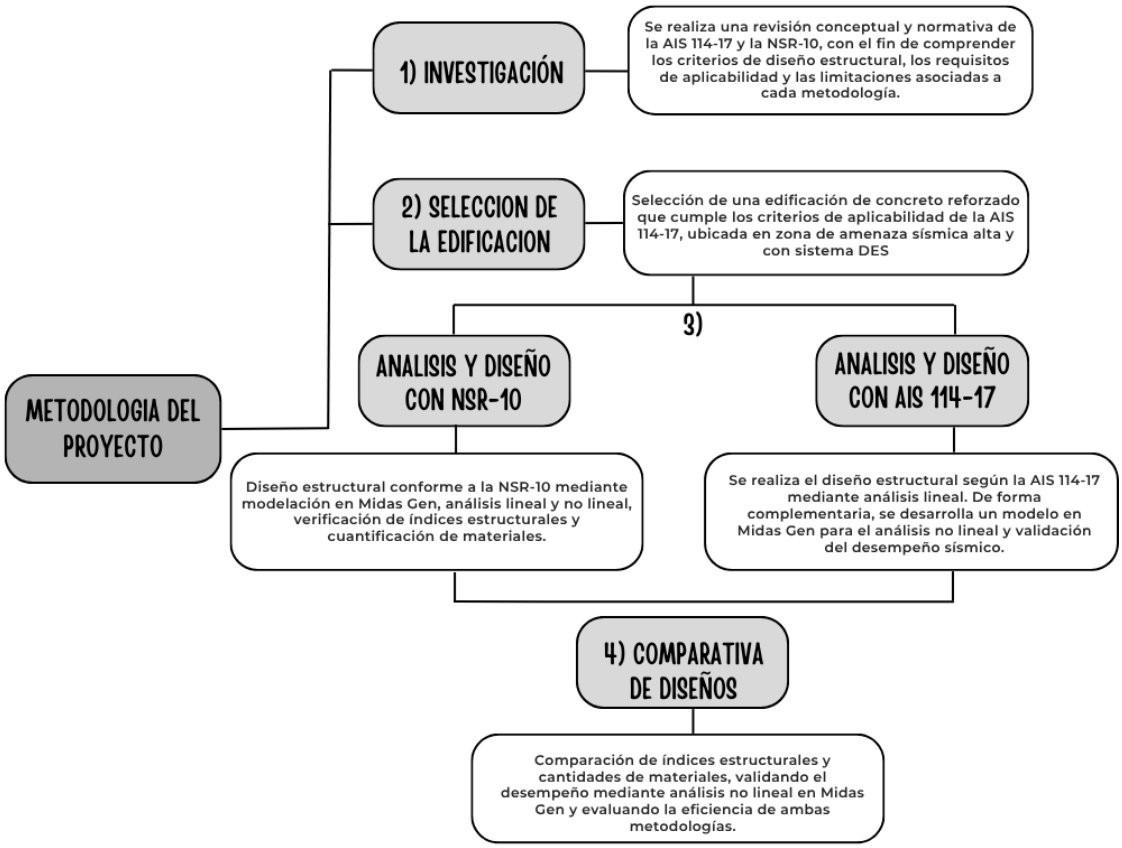


Figura 8. Cuadro sinóptico del desarrollo de la investigación.

9.1. Descripción del proyecto

El proyecto se desarrolló a partir de los planos arquitectónicos del proyecto APARTAESTUDIOS LA PLAYA, ubicado al sur de la ciudad de Cali, Valle del Cauca. No obstante, debido a que se trata de un estudio académico orientado al diseño sismorresistente según normativa vigente, la distribución arquitectónica original fue ajustada para cumplir con las restricciones establecidas por la AIS 114-17 para sistemas de muros estructurales, priorizando la regularidad en planta y elevación. La edificación analizada corresponde a una estructura de cinco niveles, destinada a uso residencial, con un área aproximada de 176m² por planta, 6 ejes transversales y 3 longitudinales con unos pequeños voladizos en la fachada principal y otros dos más grandes en la fachada posterior.

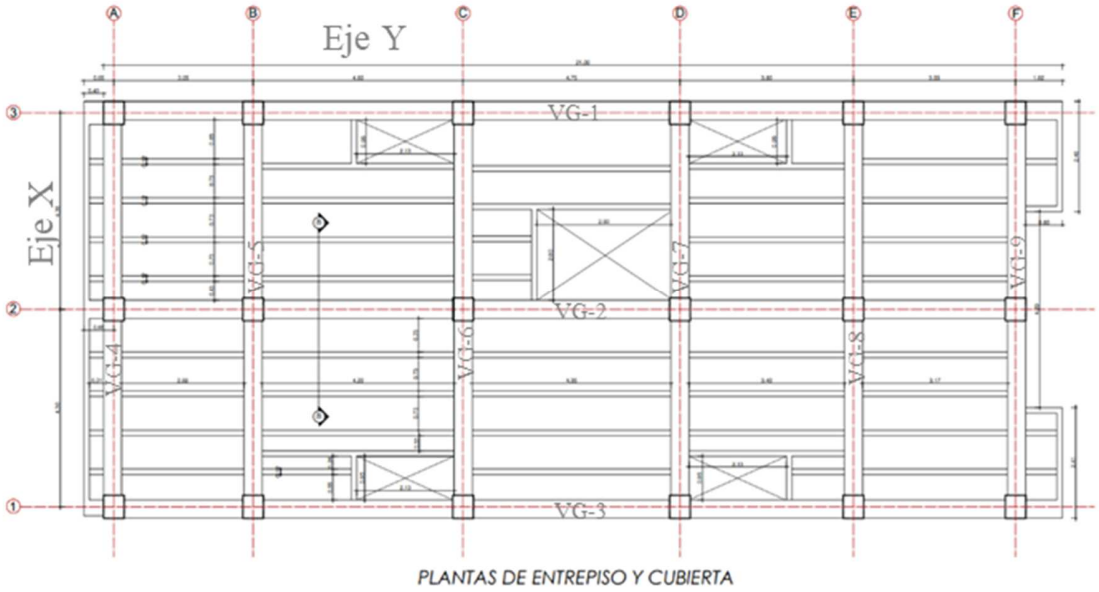


Figura 9. Vista de planta tipo y ejes principales.

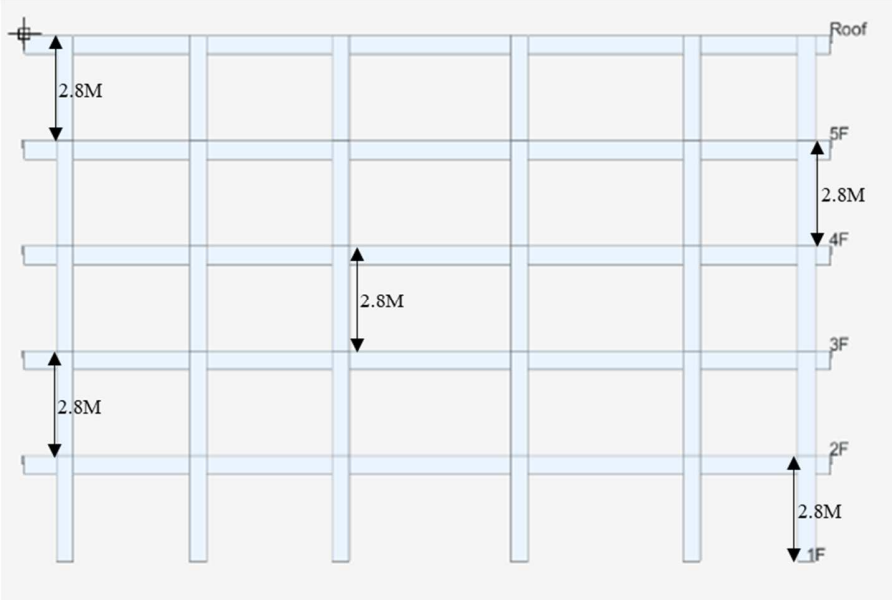


Figura 10. Vista lateral y altura de entrepiso

- Número de losas: 5
- Tipo de Losa: Aligerada.
- Tipo de Cimentación: Zapatas.
- Altura entrepiso: 2.8m

Especificaciones de los materiales:

Concreto:

- Viguetas y Riostras: f'c= 21 MPa
- Columnas y Vigas: f'c= 21 MPa
- Cimentación: f'c= 21 MPa

Acero:

- Acero de refuerzo: fy= 420 MPa

A continuación, se presentan en forma de tabla las principales limitaciones establecidas por la AIS 114-17, las cuales fueron consideradas como criterios de control durante el desarrollo del diseño estructural. Estas disposiciones se revisan y contrastan con los planos arquitectónicos originales, permitiendo identificar y justificar las modificaciones realizadas a la estructura, con el fin de garantizar el cumplimiento normativo y la coherencia entre el diseño estructural y las exigencias del reglamento.

Uso y ocupaciones permitidas

Grupo de ocupación	Subgrupo de ocupación	Permitido
A - Almacenamiento	A-1 Riesgo moderado (Utilizados para el almacenamiento de materiales pesados o peligrosos)	NO
	A-2 Riesgo bajo (Almacenamiento de materiales livianos incombustibles o de combustión muy lenta)	SI
C - Comercial	C-1a Servicios en edificaciones o espacios en donde se realizan transacciones y se ofrecen servicios profesionales o comerciales... restaurantes para menos de 50 personas	SI
	C-1b Servicios en edificaciones o espacios en donde se realizan transacciones... restaurantes para más de 50 personas	NO
	C-2 Bienes y productos (Edificaciones o espacios utilizados en la exhibición, venta y comercialización de bienes... acceso libre al público comprador)	NO

E - Especiales	E Helipuertos, parques de diversión, auto cines, cementerios	NO
F - Fbril e industrias	F-1 Riesgo moderado. Procesos de explotación, fabricación, ensamblaje... maquinaria pesada	NO
	F-2 Riesgo bajo. Procesos de explotación, fabricación, ensamblaje... niveles bajos de incendio	SI
I - Institucional	I-1 Reclusión incluyendo prisiones, reformatorios, cárceles	SI
	I-2 Salud o incapacidad, incluyendo hospitales, ancianatos... centros similares	NO
	I-3a Usados para fines educativos con menos de 500 ocupantes	SI
	I-3b Universidades, colegios, institutos... con más de 500 ocupantes	NO
	I-4 Seguridad pública... estaciones de policía, bomberos, defensa civil, instituciones militares	NO
	I-5 Servicio público en edificaciones... funciones administrativas y prestación de servicios públicos necesarios	SI
L – Lugares de reunión	L-1 Deportivos incluyendo estadios, plazas de toros... polígonos	NO
	L-2 Culturales y teatrales incluyendo auditorios, salas de teatro... carpas	NO
	L-3 Sociales y recreativos incluyendo edificaciones con salones de reunión para menos de 100 personas y sin escenario	SI
	L-4 Religiosos incluyendo iglesias, capillas, salones de culto... similares	NO
	L-5 De transporte incluyendo terminales de pasajeros, metro... salas de espera	NO
P – Alta peligrosidad	Edificaciones... producción, procesamiento, compra, venta o uso de materiales o productos altamente inflamables o explosivos	NO
Grupo R - Residencial	R-1 Unifamiliar y bifamiliar	SI

	R-2 Multifamiliar	SI
	R-3a Hoteles, pensiones, apartahoteles... con salón de reunión para menos de 100 personas	SI
	R-3b Otros hoteles, pensiones, apartahoteles... hosterías	NO

Fuente: tabla 1.3.1.1 de AIS114-17

- Edificaciones con cinco o menos pisos por encima del nivel del terreno y no más de un sótano.
- El área por piso no debe exceder 1000 m².
- La altura de entrepiso, medida entre niveles consecutivos de piso acabado, no debe exceder 4 m.
- La luz para vigas maestras, vigas y sistemas losa-columna, medida de centro a centro de los apoyos, no debe exceder 10 m.
- Las luces deben ser aproximadamente iguales y la más corta de dos luces adyacentes debe ser por lo menos igual al 80 por ciento de la luz más larga, excepto en núcleos de ascensores y escaleras.
- Debe haber por lo menos dos luces en cada dirección principal en planta. Las luces simples se permiten en edificaciones de uno y dos pisos cuando su longitud no exceda 5 m.
- En vigas maestras, vigas o losas con voladizos, la longitud de los mismos no debe exceder un tercio de la longitud del primer vano interior del elemento.

A continuación se presentan las especificaciones con las que se diseña la estructura contrastando con los usos y limitaciones presentadas anteriormente

Verificación de limitaciones para el proyecto

Limitaciones	
Uso y ocupación	R-2
Número máximo de pisos	5
Área máxima por piso	176 m2
Altura máxima de entrepiso	2,8 m
Luz máxima	4,75 m
Diferencia máxima entre luces	80 %
Número mínimo de luces	2
Relación entre longitud de voladizos y luz adyacente	29 %

Pendiente máxima para losas, vigas y viguetas	0°
Pendiente máxima del terreno	NO APLICA

Tabla 2

9.2. Modelo computacional

El análisis y diseño estructural de la edificación se realizaron mediante el software MIDAS GEN 2021, empleando un modelo tridimensional basado en el método de los elementos finitos. La estructura se representa utilizando elementos tipo frame para vigas y columnas, capaces de reproducir el comportamiento axial, flexión y cortante de estos miembros, mientras que los muros estructurales de concreto reforzado se modelaron mediante elementos tipo membrana, adecuados para captar su rigidez y resistencia frente a acciones laterales en el plano del muro.

El software considera de forma automática el peso propio de los elementos estructurales definidos, en tanto que las cargas correspondientes a placas, muros divisorios, nervios y riostras se incorporaron como cargas distribuidas dentro de la carga muerta de piso, garantizando una adecuada transferencia de dichas acciones hacia los elementos portantes del sistema. Las losas y viguetas no se modelaron explícitamente como elementos estructurales, sino que su efecto se incluyó mediante la asignación de cargas de piso.

Adicionalmente, en cada nivel se adoptó la hipótesis de diafragma rígido en su propio plano, asumiendo que todos los nodos del piso presentan los mismos desplazamientos horizontales y rotación, y que las deformaciones internas del sistema de piso son despreciables frente a las deformaciones globales de la estructura. Esta idealización permite una adecuada distribución de las acciones laterales entre los elementos, el sistema de piso tiene la rigidez suficiente para comportarse como un cuerpo rígido en su plano.

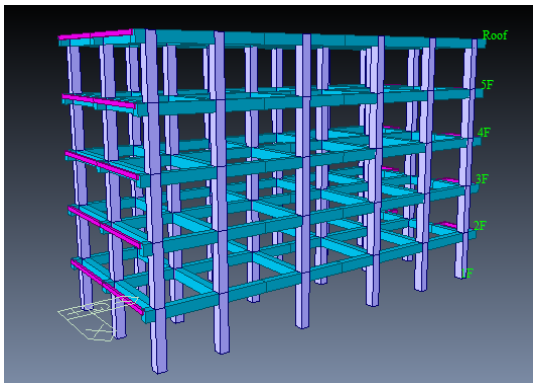


Figura 11. Modelo tridimensional MIGAS GEN. Sistema de pórticos resistentes a momentos

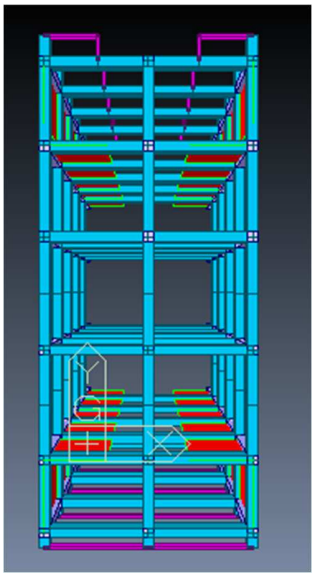


Figura 12. Vista en planta modelo tridimensional Midas Gen

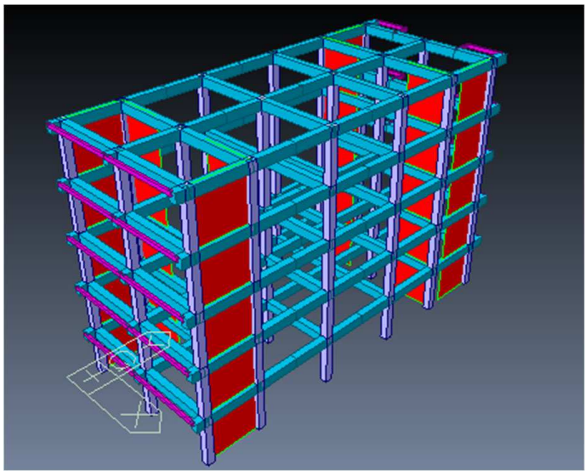


Figura 13. Modelo tridimensional MIGAS GEN. Sistema combinado

9.3. Procedimiento de modelación estructural en MIDAS GEN

El proceso de modelación estructural en el software MIDAS GEN se desarrolló de manera secuencial, garantizando la coherencia entre la geometría, las propiedades de los materiales, las cargas aplicadas y los criterios normativos adoptados. El procedimiento seguido se describe a continuación:

Definición de materiales

Inicialmente se definió el material estructural a emplear, correspondiente a concreto reforzado con una resistencia especificada a la compresión de 3000 psi. Para este material se asignaron las propiedades mecánicas requeridas por el programa, tales como el módulo de elasticidad, el peso específico y los parámetros asociados al diseño del acero de refuerzo, conforme a los valores establecidos por la normativa aplicable.

Creación de la cuadrícula

Posteriormente, se generó la cuadrícula del modelo, la cual permitió la ubicación precisa de los nodos que definen la geometría de la estructura. Esta cuadrícula se configuró de acuerdo con las dimensiones arquitectónicas del proyecto, asegurando la correcta alineación de vigas, columnas y muros en planta y elevación.

Definición de secciones transversales

Se definieron las secciones transversales correspondientes a vigas, viguetas, columnas y muros estructurales. Estas secciones fueron asignadas a los elementos del modelo según el pre-dimensionamiento adoptado, garantizando consistencia geométrica y representatividad del sistema estructural propuesto.

Asignación de condiciones de apoyo

Una vez definida la geometría, se aplicaron las restricciones en los nodos de la cimentación, modelando las condiciones de apoyo asumidas para las zapatas aisladas. Estas restricciones limitan los desplazamientos y rotaciones correspondientes, permitiendo simular adecuadamente la interacción entre la superestructura y la subestructura.

Verificación de la conectividad del modelo

Se realizó una revisión detallada de las conexiones entre los elementos estructurales, verificando la correcta unión nodal entre vigas, columnas y muros. Esta etapa permitió asegurar la continuidad estructural y la adecuada transferencia de esfuerzos dentro del modelo analítico.

Definición de la carga de piso

Posteriormente se definió la carga de piso, especificando los valores de carga muerta y carga viva según el uso de la edificación. Dentro de la carga muerta se incluyó el peso propio de las viguetas y la loseta, además de los acabados y elementos permanentes. Para ello, se

calculó previamente la cantidad de viguetas por unidad de área, con el fin de distribuir correctamente el peso del sistema de piso hacia los elementos portantes.

Adicionalmente, se identificó la dirección principal de trabajo de la losa, determinando el sentido en el cual se transmiten las cargas hacia vigas, viguetas y elementos verticales, garantizando una representación adecuada del flujo de cargas en el modelo.

Definición de acciones sísmicas

Una vez asignadas las cargas gravitacionales, se procedió a la definición de las fuerzas sísmicas, para lo cual se revisó y elaboró el espectro de diseño considerando la ubicación del proyecto, las condiciones de suelo, la altura, así como el tipo de sistema estructural, su nivel de disipación de energía y el período fundamental de la estructura. A partir de este espectro se determinó la demanda sísmica, la cual fue empleada para la aplicación del método de la fuerza horizontal equivalente, de acuerdo con los criterios establecidos en la normativa vigente.

Verificación de la capacidad estructural

Finalmente, se verificó que, con la cuantía de acero asignada a cada elemento estructural, la edificación fuera capaz de resistir de manera adecuada las combinaciones de carga establecidas y el sismo de diseño. Esta verificación incluyó la comprobación de esfuerzos, deformaciones, derivas y estados límite de resistencia, permitiendo confirmar el cumplimiento de los requisitos de seguridad y desempeño exigidos por la normativa.

10. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

10.1. Análisis y diseño Mediante NSR-10

Definición y pre-dimensionamiento del sistema de piso

El sistema de piso se definió asignando dimensiones preliminares que aseguran el cumplimiento de las solicitaciones derivadas de las cargas gravitacionales y laterales. Este pre-dimensionamiento se realizó conforme a los criterios de desempeño y a los requisitos geométricos mínimos establecidos en el Capítulo C.13 de la NSR-10, el cual especifica las disposiciones generales para losas macizas, losas aligeradas y sistemas de piso en concreto reforzado.

Los parámetros considerados incluyeron:

- Espesor mínimo admisible de acuerdo con el tipo de sistema de piso.
- Luces y relaciones de esbeltez permitidas.
- Requisitos mínimos de refuerzo positivo y negativo.
- Comportamiento del sistema de piso como parte del diafragma estructural.

Pre-dimensionamiento de columnas

El pre-dimensionamiento de las columnas se realizó considerando una carga axial de compresión acumulada y estimando las demandas de flexión en ambas direcciones principales, anticipando el comportamiento biaxial típico de los elementos sometidos a acciones sísmicas. Se adoptó una cuantía mínima de refuerzo longitudinal no inferior al 1%, conforme a lo establecido en el Capítulo C.10 de la NSR-10, y se redujo la resistencia nominal de la sección para incorporar los efectos sísmicos y las excentricidades asociadas.

Las dimensiones preliminares de las columnas se verificaron conforme a los requisitos de resistencia, esbeltez, confinamiento y cuantías mínimas definidos en los Capítulos C.10 y C.21 de la NSR-10, aplicables a elementos de concreto reforzado en zonas sísmicas.

Avalúo de cargas

Se realizó el avalúo de las cargas gravitacionales y laterales actuantes sobre la estructura, siguiendo los lineamientos establecidos en el Título B de la NSR-10, que regula la determinación de cargas permanentes, cargas variables y demás acciones relevantes para el diseño estructural.

Carga muerta

En una primera fase, se determinan las cargas correspondientes a la losa aligerada y las cargas sobreimpuestas. Las dimensiones empleadas son el producto de los cálculos detallados en la sección dedicada al diseño de los elementos (Ver anexo 3. “memoria de cálculo NSR-10”).

Peso propio de la Losa piso y cargas adicionales.

Elemento	**q (kN/m^2)**
Loseta	1.20
Vigueta	1.08
Casetón esterilla	0.30
Ductos	0.20
Placa panel	0.09
Muros	3.00
Piso	1.10
Total	6.98

Tabla 3

La carga muerta adicional para la losa de entrepiso nivel 2-3-4 será igual 6.976 KN/m^2, para la losa de cubierta la carga muerta es de 5.576 KN/m^2 teniendo en cuenta que es una cubierta simplemente con muros perimetrales.

Nota: Teniendo en cuenta que las viguetas no deben considerarse parte del sistema de resistencia sísmica para efectos de rigidez ante fuerzas horizontales, se realizó el prototipo sin modelar las mismas, sin embargo, su peso es tenido en cuenta en el momento de modelar la carga de piso, en donde se incorpora la cantidad (4 por vano) así como el peso de la loseta.

Carga viva

Basados en las especificaciones del Reglamento NSR-10, por ser una estructura de ocupación residencial, se le asigna una carga viva de 1.8 KN/m^2, para pasillos y alcobas y una carga de 5 KN/m^2 para los balcones.

Diseño del sistema de piso

Para el diseño de las viguetas y la loseta se evaluaron todas las solicitaciones que actúan sobre el sistema de piso, siguiendo los requisitos de resistencia, rigidez y detallado establecidos en el Capítulo C.9 de la NSR-10, aplicables a elementos de concreto estructural. El diseño consideró los efectos combinados de cargas gravitacionales, acciones sísmicas

transmitidas por el diafragma y las condiciones de apoyo, verificando el cumplimiento de la capacidad mínima requerida para flexión, cortante y deformaciones admisibles.

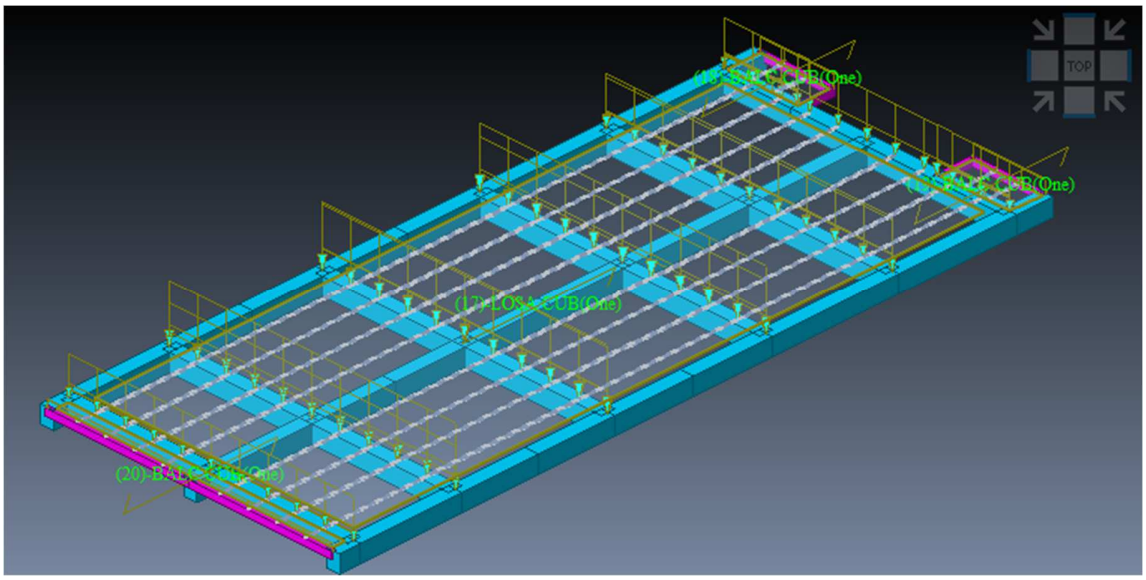


Figura 14. Distribución de cargas en losa diseñada con NSR-10

Diseño de vigas y columnas

El diseño de vigas y columnas se efectuó evaluando los valores máximos de las solicitaciones internas resultantes de las combinaciones de carga prescritas en el Capítulo B.2 de la NSR-10.

El diseño se desarrolló de acuerdo con el sistema estructural adoptado y los requisitos de resistencia, ductilidad, cuantías mínimas, compatibilidad de deformaciones y detallado establecidos en los capítulos correspondientes del Título C de la NSR-10 para estructuras de concreto reforzado en zonas sísmicas.

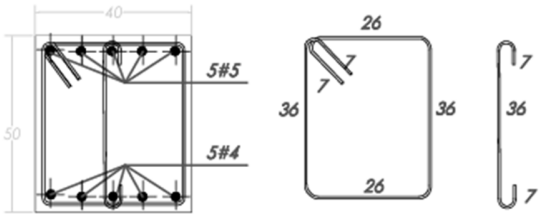


Figura 15a. Sección típica vigas de carga

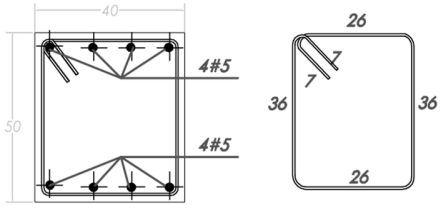


Figura 15b. Sección típica vigas secundarias

Análisis sísmico y verificación de derivas

El análisis sísmico se efectuó aplicando los movimientos de diseño según la ubicación y tipo de suelo establecidos en el Capítulo A.2 de la NSR-10, mediante un modelo analítico de elementos finitos elaborado en el software MIDAS GEN. Con este modelo se determinaron los desplazamientos laterales máximos generados por las fuerzas sísmicas correspondientes a las combinaciones de carga de diseño

Con ayuda del software se puede definir una función para el espectro de respuesta.

A continuación, se presentan los datos utilizados para determinar los parámetros sísmicos, partiendo de la suposición de que la estructura estuviera ubicada en la ciudad de Cali y seleccionando un tipo de suelo (D) que es muy común encontrar en dicha ciudad.

Tipo de suelo	D
Aa	0.25
Av	0.25
Fa	1.3
Fv	1.9
Coeficiente de importancia	1

Tabla 4

Con estos valores de aceleración pico efectiva, tipo de suelo, coeficientes de aceleración para periodos cortos y largos, que coinciden con el reglamento NSR-10, además de la importancia y el factor de ductilidad se determina la función del espectro.

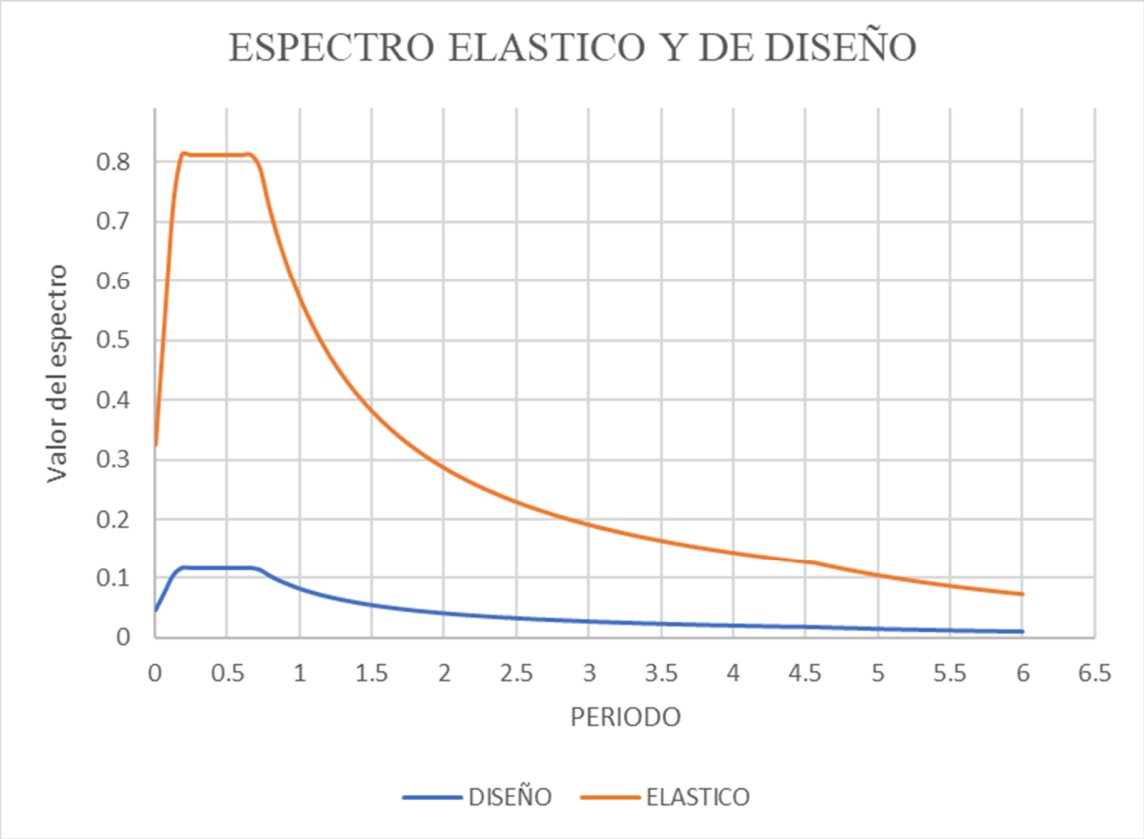


Figura 16. Espectro elástico y de diseño.

El espectro reducido se calcula una vez revisadas las irregularidades de la estructura que permiten conocer el factor de reducción que se aplica a una estructura porticada resistente a momentos que se encuentra en zona de amenaza sísmica alta, R=7

Se procede a calcular el valor del periodo fundamental Ta de la estructura según lo estipulado por A.4.2 de la NSR-10, para poder ingresar al espectro elástico de diseño y obtener el valor del coeficiente Sa.

Sistema estructural de resistencia sísmica	C_t	α
Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.047	0.9

Tabla 5

$$Ta = 0.047 * 14^{0.9} = 0.5053\ sec$$

Para comprobar que los datos suministrados por el modelo son coherentes se procede a realizar el cálculo aproximado de la fuerza horizontal equivalente, siendo este un método que consiste en representar las fuerzas horizontales de diseño mediante cargas laterales estáticas. (Ver anexo 2. "fuerza horizontal equivalente")

Cálculo de fuerzas sísmicas por piso (KN)						
Nivel	Wdl	Wll	W perm	w perm.hk	Cvx	Fx
0	0	0	0	0	0	0
1	2063	78.89	2142	5141	0.067	560.4
2	2063	78.89	2142	11138	0.145	1214
3	2063	78.89	2142	16494	0.214	1798
4	2063	78.89	2142	21849	0.284	2382
5	1682	78.89	1761	22359	0.291	2437
Total	9934	394.4	10329	76980	1	8392
Peso por metro cuadrado		58.74	KN			

Tabla 6

En la tabla 6 se observa como la sumatoria de las fuerzas horizontales corresponde a la cortante basal que se calcula multiplicando el peso permanente total de la estructura por el coeficiente Sa.

Datos generales	
Periodo aprox	0.505
Ct	0.047
Alfa	0.9
Altura (h)	14m
Sa	0.813
Cortante basal (V)	8392 KN

Tabla 7

Datos espectro reducido	
Periodo aprox	0.505
Ct	0.047
Alfa	0.9
Altura	14m
Sa	0.116
Cortante basal	1199 KN

Tabla 8

Datos arrojados por el modelo de Midas Gen

Story Name	Weight	Elev.
Roof	1743.6343	14.0
5F	2129.1742	11.2
4F	2129.1742	8.4
3F	2129.1742	5.6
2F	2129.1742	2.8
G.L.	--	0.0

Tabla 9

Story Name	Story Force	Story Shear
Roof	346.36592	0.0
5F	338.1577	346.36592
4F	253.42136	684.52362
3F	168.76272	937.94497
2F	84.223586	1106.7077
G.L.	--	1190.9313

Tabla 10

Comparando los datos de cortante basal y peso por piso de la estructura calculados a mano, con los datos arrojados por el modelo se tienen diferencias menores al 2%

Diseño de zapatas y vigas de cimentación

Las zapatas se diseñaron teniendo en cuenta tanto las cargas verticales como las combinaciones de carga gravitacionales y sísmicas obtenidas del análisis estructural y requisitos contemplados en el Título C de a NSR-10, criterios de diseño para estructuras de cimentación superficial como zapatas aisladas, zapatas combinadas y losas de cimentación, estableciendo que estas deben ser capaces de transmitir las cargas al suelo sin exceder la capacidad portante admisible ni generar asentamientos diferenciales que comprometan la estabilidad estructural.

10.2. Análisis y diseño mediante AIS 114-17

Definición y pre-dimensionamiento del sistema de piso

El sistema de piso se configuró asignando dimensiones preliminares que garantizaran un comportamiento adecuado frente a las cargas gravitacionales y laterales. Este proceso se llevó a cabo siguiendo los lineamientos del Capítulo 6 y 7 de la AIS 114-17, que establece los requerimientos geométricos mínimos de losas, viguetas y elementos asociados.

En esta etapa se consideraron aspectos como:

- Espesores mínimos del sistema de piso según su tipología.
- Relaciones de esbeltez admisibles en función de las luces de diseño.
- Cuantías mínimas de refuerzo y exigencias de continuidad estructural.

- Interacción del sistema de piso con el diafragma y los elementos verticales.

Pre-dimensionamiento de columnas

El pre-dimensionamiento de las columnas se efectuó con base en las cargas axiales y momentos biaxiales estimados para cada nivel, aplicando los criterios del Capítulo 10 de la AIS 114-17. Se adoptaron cuantías mínimas de refuerzo y condiciones geométricas que garantizaran la resistencia, estabilidad y confinamiento adecuados de los elementos verticales, anticipando su demanda sísmica y las exigencias de ductilidad propias del sistema estructural.

Avalúo de cargas

La determinación de las cargas actuantes se desarrolló siguiendo los criterios definidos en el Capítulo 4 de la AIS 114-17, donde se establecen los procedimientos para cuantificar las cargas permanentes, variables y demás acciones relevantes para el análisis estructural. En esta etapa se estimaron las cargas de servicio asociadas al uso del edificio, diferenciando entre carga muerta y carga viva.

En una primera fase, se determinan las cargas correspondientes a la losa aligerada y las cargas sobreimpuestas. Las dimensiones empleadas son el producto de los cálculos detallados en la sección dedicada al diseño de los elementos (Ver anexo 3.“memorias de cálculo”).

Peso propio de la Losa piso y cargas adicionales.

Elemento	**q (kN/m^2)**
Loseta	1.68
Vigueta	2.64
Casetón esterilla	0.30
Ductos	0.20
Placa panel	0.09
Muros	3.00
Piso	1.10
Total	9.02

Tabla 11

La carga muerta adicional para la losa de entrepiso nivel 2-3-4 será igual 9.016 KN/m^2, para la losa de cubierta la carga muerta es de 7.616 KN/m^2 teniendo en cuenta que es una cubierta simplemente con muros perimetrales.

Nota: Teniendo en cuenta que las viguetas no deben considerarse parte del sistema de resistencia sísmica para efectos de rigidez ante fuerzas horizontales, se realizó el prototipo sin modelar las mismas, sin embargo, su peso es tenido en cuenta en el momento de modelar la carga de piso, en donde se incorpora la cantidad (6 por vano) así como el peso de la loseta.

Carga viva

Basados en las especificaciones de la norma AIS 114-17, por ser una estructura de ocupación residencial, se le asigna una carga viva de 2.2 KN/m^2, para pasillos y alcobas y una carga de 5.5 KN/m^2 para los balcones.

Análisis sísmico y verificación de derivas

La Normativa AIS 114-17 no exige la verificación de derivas, ya que siguiendo todos los lineamientos, cuantías y secciones mínimas se garantiza la rigidez necesaria para resistir las fuerzas laterales que puede recibir la estructura. Sin embargo, para lograr el cumplimento de todos los objetivos planteados en el proyecto, se utilizó un modelo tridimensional de elementos finitos implementado en el software MIDAS GEN.

En este caso para el análisis sísmico según el capítulo 4 de la AIS 114-17 se procede a calcular las ordenadas del espectro de diseño Sa

$$Sa = 2.5\,Aa * Fa = 2.5 * 0.25 * 1.3 = 0.8125$$

Para los valores de la aceleración pico efectiva para períodos cortos y coeficiente de sitio, la AIS 114-17 se basa en El Reglamento NSR-10



Figura 17. Espectro reducido.

Según el sistema estructural usado, que en este caso es un sistema combinado, el valor indicado para el coeficiente de modificación de respuesta basado en un sistema con capacidad de disipación de energía especial (DES) en zona de amenaza sísmica alta es Rs = 5

Para comprobar que los datos suministrados por el modelo son coherentes se procede a realizar el cálculo aproximado de la fuerza horizontal equivalente, siendo este un método que consiste en representar las fuerzas horizontales de diseño mediante cargas laterales estáticas. (Ver anexo 2. "fuerza horizontal equivalente")

Cálculo de fuerzas sísmicas por piso						
Nivel	Wdl	Wll	W perm	w perm.hk	cvx	fx
0	0	0	0	0	0	0
1	2692	96.42	2788	6691	0.067	730.2
2	2692	96.42	2788	14497	0.146	1582
3	2692	96.42	2788	21467	0.216	2343
4	2692	96.42	2788	28437	0.286	3103
5	2175	96.42	2271	28843	0.289	3148
total	12941	482.1	13423	99936	1	10906
Peso por metro cuadrado		76.34	KN			

Tabla 12

Datos generales	
Periodo aprox	0.355
Ct	0.049
Alfa	0.9
Altura	14
Sa	0.813
Cortante basal	10906 KN

Tabla 13

Datos espectro reducido	
Periodo aprox	0.355
Ct	0.049
Alfa	0.75
Altura	14
Sa	0.163
Cortante basal	2181 KN

Tabla 14

Datos arrojados por el modelo de Midas Gen

Story Name	Weight	Elev.
Roof	2312.584	14.0
5F	2827.6535	11.2
4F	2827.6535	8.4
3F	2827.6535	5.6
2F	2827.6535	2.8
G.L.	--	0.0

Tabla 15

Story Name	Story Force	Story Shear
Roof	642.51988	0.0
5F	628.49992	642.51988
4F	471.37494	1271.0198
3F	314.24996	1742.3947
2F	157.12498	2056.6447
G.L.	--	2213.7697

Tabla 16

Comparando los datos de cortante basal y peso por piso de la estructura calculados a mano, con los datos arrojados por el modelo se tienen diferencias menores al 2%

Diseño de vigas y viguetas

El dimensionamiento de vigas, viguetas y demás elementos lineales se realizó aplicando los requisitos del Capítulo 8 de la AIS 114-17, que establece las reglas para el diseño por flexión y cortante, las cuantías mínimas, los requisitos de confinamiento del refuerzo, las disposiciones para el desarrollo de barras y la compatibilidad de deformaciones.

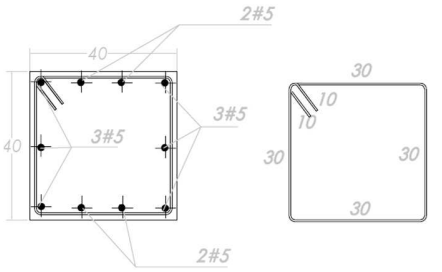


Figura 18a. Sección tipo, columnas tipo 2 (AIS)

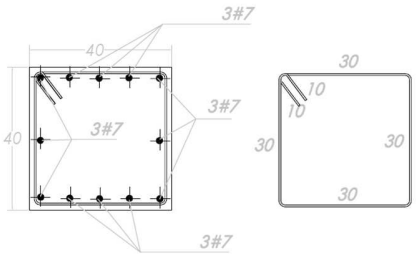


Figura 18b. Sección tipo, columnas tipo 1 (AIS)

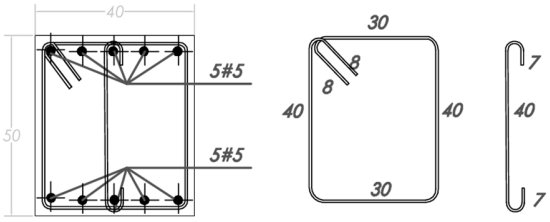


Figura 19a. Sección típica vigas de carga (AIS)

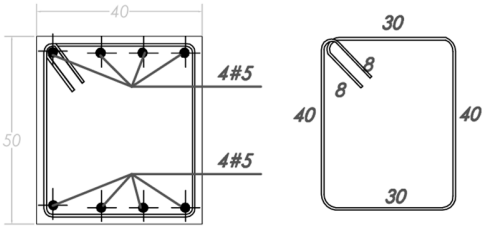


Figura 19b. Sección típica vigas secundarias (AIS)

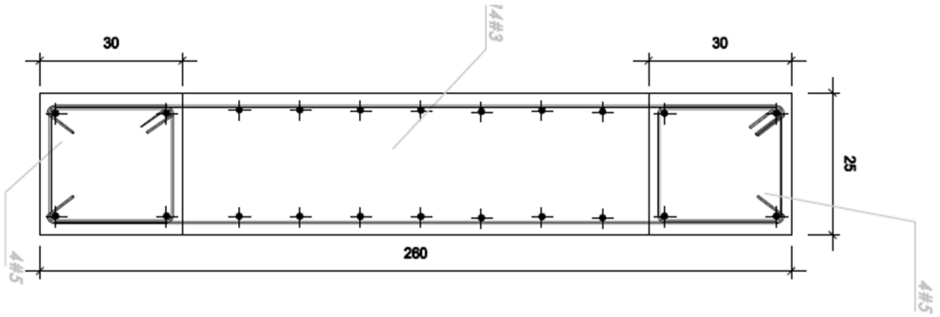


Figura 20. Sección típica muros estructurales (AIS)

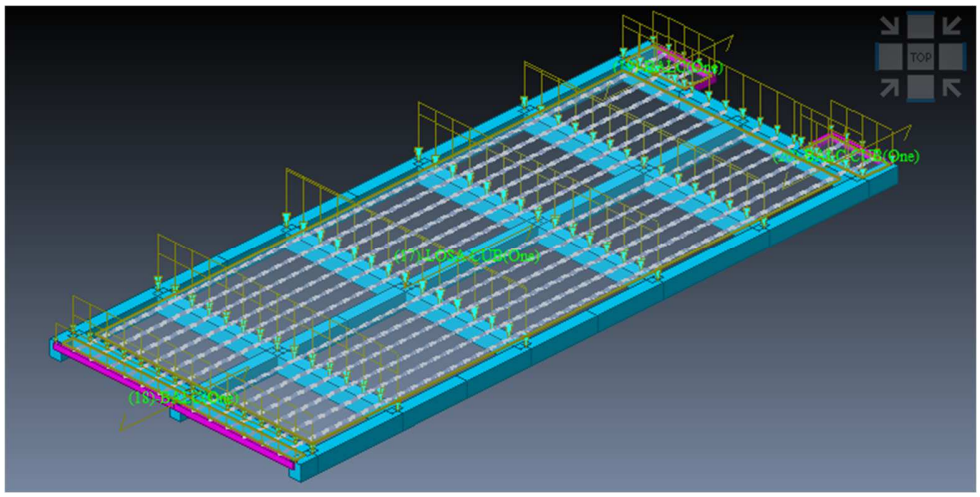


Figura 21. Distribución de cargas en losa diseñada con AIS 114-17

Diseño de muros estructurales de concreto

Los muros de concreto reforzado se diseñaron de acuerdo con los criterios presentados en el Capítulo 11 de la AIS 114-17, que regula su comportamiento frente a cargas gravitacionales y cargas laterales. Se verificaron aspectos como la esbeltez, la rigidez mínima requerida, la cuantía de refuerzo vertical y horizontal, las condiciones de confinamiento y la interacción con los diafragmas. Asimismo, se garantizó la correcta integración entre muros, losas y vigas de amarre para asegurar una adecuada transmisión de esfuerzos.

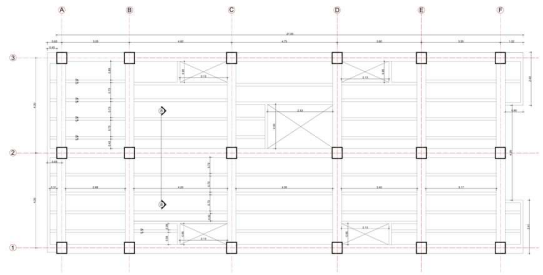


Figura 22a. Distribución de elementos en planta NSR-10

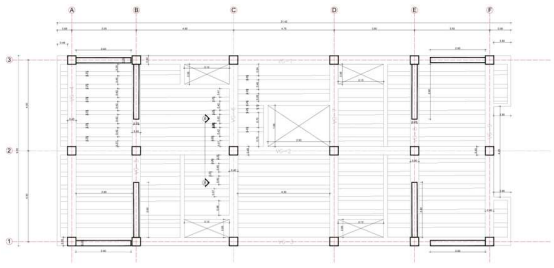


Figura 22b. Distribución de elementos en planta AIS 114-17

Diseño de zapatas y vigas de cimentación

La cimentación se diseñó siguiendo los lineamientos del Capítulo 14 de la AIS 114-17, aplicable al diseño de cimentaciones superficiales, integrando en este caso las cargas transmitidas mediante las columnas y los muros estructurales en unas zapatas aisladas que dependiendo de su ubicación y conexión con otros elementos cumple con la cuantía que exige la norma.

11. RESULTADOS

11.1. Índices de sobreesfuerzo

El índice de sobreesfuerzo se define como el cociente entre las solicitaciones equivalentes que actúan sobre cada elemento de la estructura incluyendo los efectos del sismo, las cargas gravitacionales, el viento y las combinaciones de carga establecidas por la normativa y la resistencia efectiva del elemento, la cual se obtiene a partir de la resistencia nominal ajustada mediante los factores de reducción exigidos por la norma aplicable. Este índice constituye una herramienta fundamental para la evaluación de la seguridad estructural, pues permite comparar directamente la demanda frente a la capacidad real de los elementos y verificar que estos cumplen adecuadamente según la norma de diseño.

Para hacer un correcto análisis de los índices de sobreesfuerzo obtenidos, es necesario tener presente que elementos y que sección se utilizó en cada diseño

Elemento	Sección NSR-10 (cm)	Sección AIS 114 (cm)
Columnas	45X50	40X40
Muros	-	260X25
Vigas	40X50	40X50
Loseta	5	7
Viguetas	12X30	20X33

Tabla 17

Índices en columnas

A continuación, se presentan los índices de flexo-compresión P-M-M en cada una de las columnas de la edificación verificando que cada una de ellas cumple con las solicitaciones de diseño.

Índices de flexo compresión en columnas

Ubicación	AIS 114-17	NSR-10
A1	0.35	0.67
A2	0.48	0.62
A3	0.35	0.67
B1	0.48	0.61
B2	0.81	0.65
B3	0.48	0.61
C1	0.55	0.61
C2	0.90	0.67
C3	0.55	0.61
D1	0.77	0.59

D2	0.70	0.65
D3	0.77	0.59
E1	0.94	0.57
E2	0.70	0.60
E3	0.94	0.57
F1	0.57	0.65
F2	0.60	0.60
F3	0.57	0.65

Tabla 18

Los resultados evidencian que los índices de sobreesfuerzo obtenidos conforme a la NSR-10 son mayores, aun cuando se dispone de columnas con mayor sección transversal. Este comportamiento se explica debido a que el sistema estructural analizado no cuenta con muros estructurales, por lo que es necesario controlar el valor máximo de deriva permitido principalmente a través de la rigidez aportada por los pórticos. En este contexto, el incremento en las dimensiones de las columnas contribuye de manera significativa a la resistencia y rigidez del sistema, permitiendo que, durante el proceso de diseño, el concreto aporte una fracción considerable de la capacidad resistente. En consecuencia, las columnas no requieren elevadas cuantías de acero de refuerzo, siendo suficiente, en varios casos, la colocación del refuerzo mínimo 1% de la sección bruta según la norma o ligeramente superior, lo cual se refleja en índices de sobreesfuerzo más elevados, pero siempre dentro de los límites admisibles.

Desde la perspectiva de la AIS 114-17, los índices de sobreesfuerzo muestran una mayor variabilidad, alcanzando en algunos casos valores máximos superiores a los obtenidos con la NSR-10. Esta variación se debe a que la AIS 114-17 adopta un enfoque de diseño en el cual, aun empleando columnas de menor sección transversal, la capacidad resistente se ajusta principalmente mediante la cuantía de acero de refuerzo, lo que genera diferencias más marcadas en el nivel de utilización de las columnas según su ubicación y demanda

Índices de sobreesfuerzo en vigas

A continuación, se presentan los índices de sobreesfuerzo a flexión correspondientes a las vigas principales y secundarias de la edificación. Es importante aclarar que el software MIDAS Gen reporta estos resultados de manera seccional, evaluando la relación demanda/capacidad en distintos puntos de cada elemento estructural. Por tal motivo, para cada nivel se presentan únicamente las secciones críticas, definidas como aquellas en las que la viga alcanza el mayor valor de demanda, con el fin de identificar de manera representativa los elementos y zonas más exigidas del sistema estructural, en el caso puntual de las vigas principales que son las vigas de carga se presentan los valores obtenidos en los extremos y en el apoyo del eje central, siendo estos los puntos en donde se presentan los valores más significativos, para el caso de las vigas secundarias se presentan los valores de los extremos (puntos cercanos a los apoyos) y en el centro de la luz de la sección más crítica de la viga.

Índice de sobreesfuerzo en vigas secundarias

Nivel +2.8	AIS 114-17			NSR-10		
	índice inicio	Índice en el centro	Indicie final	Indice inicio	Índice en el centro	Indice final
VG-1	0.4633	0.3354	0.26	1.00	0.97	0.89
VG-2	0.2851	0.1567	0.22	1.00	1.00	0.8779
VG-3	0.4633	0.3354	0.26	1.00	0.97	0.89

Tabla 19

Nivel +5.6	AIS 114-17			NSR-10		
	índice inicio	índice en el centro	Indicie final	Indice inicio	Índice en el centro	Indice final
VG-1	0.7051	0.5621	0.45	0.98	0.94	0.8345
VG-2	0.4058	0.3059	0.28	1.00	0.9829	0.8104
VG-3	0.7051	0.5621	0.45	0.98	0.94	0.8345

Tabla 20

Nivel +8.4	AIS 114-17			NSR-10		
	Indice inicio	Indice en el centro	Indicie final	Indice inicio	Indice en el centro	Indicie final
VG-1	0.8396	0.6886	0.56	0.78	0.7459	0.6448
VG-2	0.4732	0.3635	0.32	0.83	0.798	0.6898
VG-3	0.8396	0.6886	0.56	0.78	0.7459	0.6448

Tabla 21

Nivel +11.2	AIS 114-17			NSR-10		
	Indice inicio	Indice en el centro	Indicie final	Indice inicio	Índice en el centro	Indice final
VG-1	0.8976	0.742	0.61	0.56	0.5283	0.4391
VG-2	0.508	0.3939	0.35	0.51	0.4696	0.3875
VG-3	0.8976	0.742	0.61	0.56	0.5283	0.4391

Tabla 22

Nivel +14	AIS 114-17			NSR-10		
	Indice inicio	Indice en el centro	Indicie final	Indice inicio	Índice en el centro	Indice final
VG-1	0.8602	0.7283	0.53	0.22	0.1854	0.1082
VG-2	0.4031	0.2938	0.24	0.27	0.2384	0.153
VG-3	0.8602	0.7283	0.53	0.22	0.1854	0.1082

Tabla 23

Los resultados muestran que el diseño conforme a la AIS 114-17 presenta índices de sobreesfuerzo significativamente menores que los obtenidos mediante la NSR-10, manteniéndose en rangos ampliamente inferiores a la unidad. Este comportamiento evidencia que, aun en las combinaciones más críticas, las vigas secundarias diseñadas con la AIS 114-17 trabajan con amplios márgenes de seguridad, asociados a un sistema estructural globalmente más rígido y a una menor demanda sobre los elementos horizontales.

Por el contrario, el diseño basado en la NSR-10 arroja valores de índice cercanos a la unidad en varias secciones y niveles, lo que indica que las vigas secundarias alcanzan estados de solicitación más exigentes respecto a su capacidad resistente. Si bien estos valores cumplen con los criterios normativos, reflejan un mayor nivel de aprovechamiento estructural, coherente con un diseño menos conservador y orientado a la eficiencia en el uso del material.

Índice de sobreesfuerzo en vigas principales

Nivel +2.8	AIS 114-17		NSR-10	
	Índice extremos	Índice en el centro	Índice extremos	Índice en el centro
VG-4	0.3488	0.3132	0.8981	0.8021
VG-5	0.6475	0.4361	0.742	0.7316
VG-6	0.5327	0.5816	0.7742	0.7685
VG-7	0.5016	0.5443	0.731	0.7244
VG-8	0.608	0.4072	0.6761	0.6684
VG-9	0.3608	0.3377	0.683	0.5563

Tabla 24

Nivel +5.6	AIS 114-17		NSR-10	
	Índice extremos	Índice en el centro	Índice extremos	Índice en el centro
VG-4	0.4737	0.3332	0.9155	0.8736
VG-5	0.8293	0.4558	0.7836	0.7249
VG-6	0.6617	0.6007	0.8163	0.7518
VG-7	0.6237	0.5622	0.7656	0.7048
VG-8	0.763	0.412	0.7025	0.649
VG-9	0.4712	0.3491	0.673	0.5748

Tabla 25

Nivel +8.4	AIS 114-17		NSR-10	
	Índice extremos	Índice en el centro	Índice extremos	Indice en el centro
VG-4	0.5347	0.3287	0.6885	0.6859
VG-5	0.9322	0.4474	0.7013	0.6232
VG-6	0.7192	0.5971	0.741	0.6512
VG-7	0.6767	0.5576	0.6939	0.6096
VG-8	0.8474	0.3942	0.6325	0.5597
VG-9	0.5226	0.3408	0.5219	0.4695

Tabla 26

Nivel +11.2	AIS 114-17		NSR-10	
	Índice extremos	Índice en el centro	Índice extremos	Índice en el centro
VG-4	0.5698	0.3152	0.4564	0.3961
VG-5	0.9783	0.4279	0.5743	0.4799
VG-6	0.754	0.5828	0.6236	0.5118
VG-7	0.7074	0.5423	0.5827	0.4778
VG-8	0.8822	0.3697	0.5251	0.4349
VG-9	0.5486	0.3233	0.4112	0.3571

Tabla 27

Nivel +14	AIS 114-17		NSR-10	
	Índice extremos	Índice en el centro	Índice extremos	Índice en el centro
1+14	0.4228	0.2092	0.2691	0.2268
2+14	0.9167	0.3217	0.3336	0.3136
3+14	0.5602	0.4494	0.405	0.3443
4+14	0.526	0.4164	0.3774	0.3206
5+14	0.8234	0.2727	0.3367	0.2899
6+14	0.3908	0.2272	0.2394	0.2312

Tabla 28

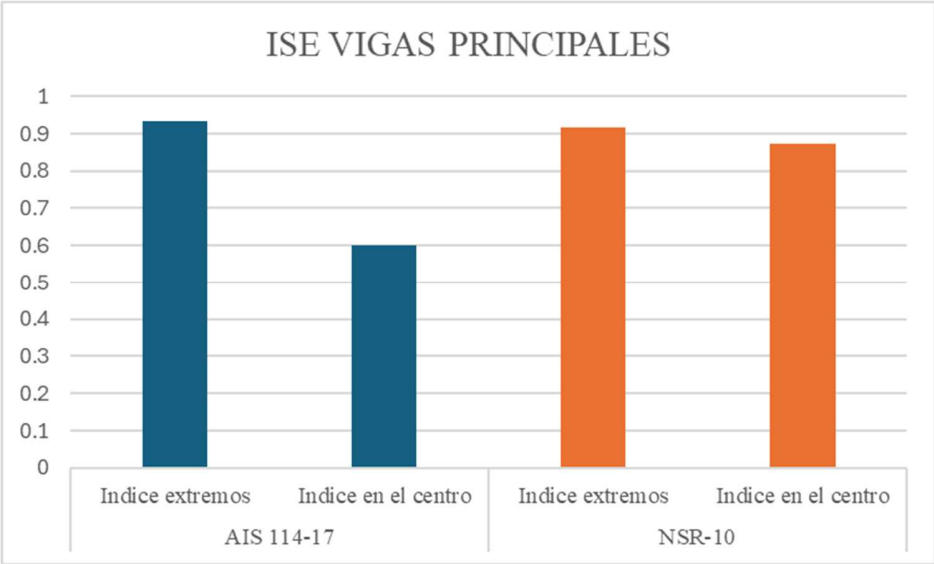


Figura 23. Indices de sobreesfuerzo de vigas principales

Al comparar los índices de sobreesfuerzo de los elementos estructurales, se evidencia que las vigas son los componentes que concentran las mayores demandas dentro del sistema aporticado, superando consistentemente los valores obtenidos en las columnas. Este comportamiento es coherente con el mecanismo esperado de diseño sismorresistente, donde los elementos flexionados deben actuar como disipadores principales de energía, mientras que las columnas conservan un mayor margen de capacidad para garantizar la estabilidad global de la estructura.

Particularmente en las vigas principales, los resultados muestran que bajo los criterios de la NSR-10 los mayores índices se presentan en los niveles inferiores, asociados a los momentos flectores generados por las fuerzas sísmicas equivalentes. No obstante, el diseño según AIS 114-17 presenta menores contrastes entre estos valores, lo cual es consistente con un comportamiento estructural más controlado, asociado a mayores rigideces globales y a la presencia de muros estructurales que reducen la participación de las vigas en la resistencia lateral.

En conjunto, los resultados permiten concluir que la diferencia entre ambas normativas no radica en el cumplimiento de los estados límite, sino en el nivel de holgura estructural (margen de seguridad) con el que los elementos horizontales resisten las solicitaciones críticas, siendo la AIS 114-17 más conservadora y la NSR-10 más eficiente desde el punto de vista estructural.

11.2. Derivas de piso

La deriva en una edificación se define como el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos ubicados en la misma línea vertical, correspondientes a pisos o niveles consecutivos. Según los lineamientos establecidos en la NSR-10, la deriva máxima permisible en cualquier nivel no debe superar el 1 % de la altura del piso para la mayoría de sistemas estructurales que cumplen los requisitos de diseño sismo resistente.

Porcentaje de derivas con fuerza horizontal equivalente				
	NSR-10		AIS 114-17	
Niveles	Eje X	Eje Y	Eje X	Eje Y
14	0.40%	0.27%	0.51%	0.30%
11.2	0.68%	0.49%	0.51%	0.31%
8.4	0.91%	0.66%	0.48%	0.30%
5.6	1.00%	0.75%	0.37%	0.24%
2.8	0.66%	0.59%	0.17%	0.12%
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 29

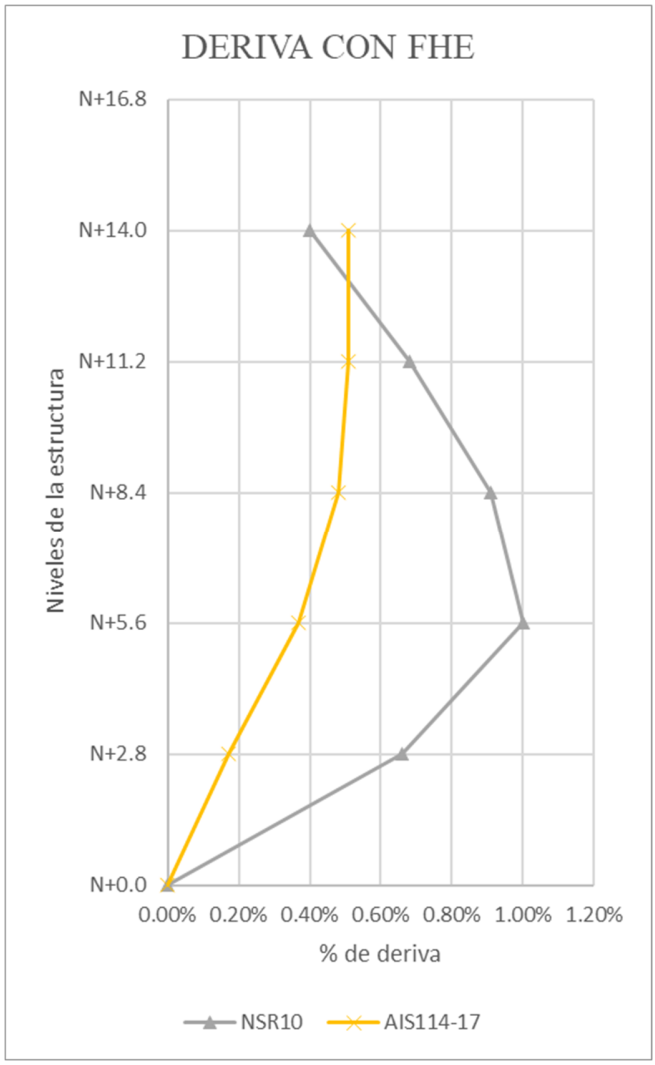


Figura 24. Derivas con método de fuerza horizontal equivalente

Porcentaje de derivas con espectro de respuesta				
	NSR-10		AIS 114-17	
Niveles	**Eje X**	**Eje Y**	**Eje X**	**Eje Y**
14	0.37%	0.21%	0.43%	0.24%
11.2	0.64%	0.40%	0.43%	0.25%
8.4	0.86%	0.55%	0.40%	0.23%
5.6	0.96%	0.64%	0.31%	0.18%
2.8	0.64%	0.50%	0.14%	0.09%
0	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Tabla 30

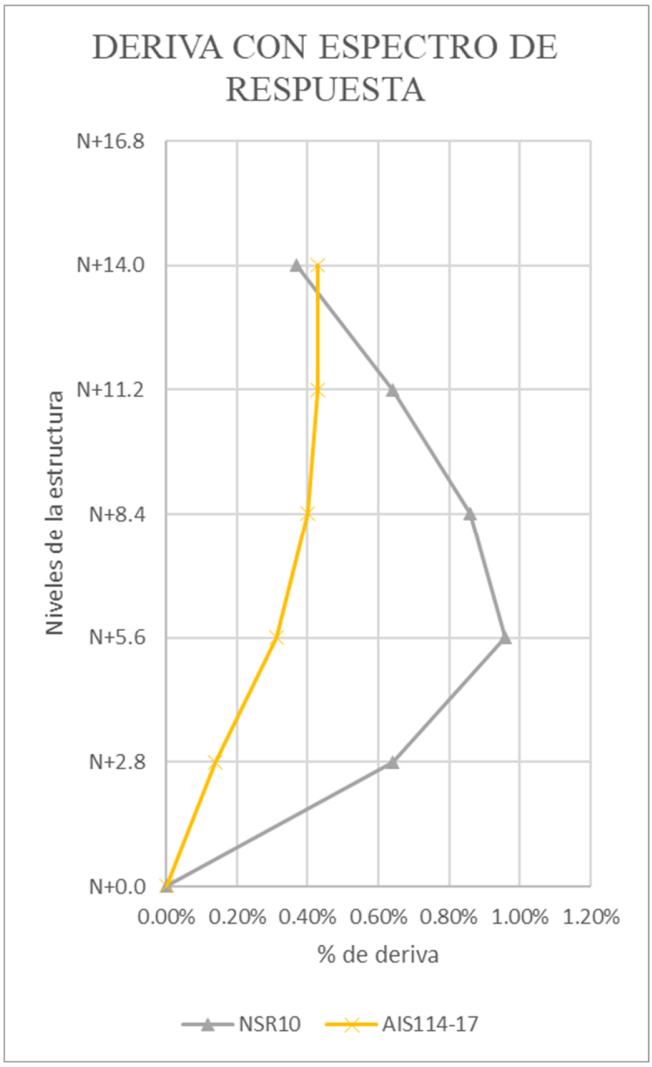


Figura 25. Derivas con Análisis espectral

A partir del modelado estructural realizado en el software Midas Gen para cada uno de los diseños evaluados, se observa que la estructura diseñada bajo los criterios de la AIS 114-17 presenta una rigidez lateral significativamente mayor. En este caso, la deriva máxima obtenida no alcanza siquiera la mitad del límite permisible del reglamento, registrándose alrededor de 0.43 %, lo cual evidencia un control adecuado de las deformaciones laterales.

Asimismo, se identifica que las derivas máximas se desarrollan en niveles diferentes según la normativa aplicada. Para el diseño basado en la NSR-10, la deriva máxima ocurre en el nivel N+5.6 m, mientras que para el diseño conforme a la AIS 114-17, el valor máximo se presenta en el nivel N+11.2 m.

El diseño con AIS 114-17 genera una respuesta global más rígida (menores derivas absolutas), lo que tiende a concentrar los desplazamientos relativos en la parte superior del edificio, comportamiento asociado al primer modo de vibración que se asemeja al comportamiento típico de estructuras dominadas por elementos rígidos. Este comportamiento es consistente con lo establecido en la teoría dinámica estructural, donde estructuras con mayor rigidez presentan períodos fundamentales más cortos y modos de vibración con menor concentración de deformaciones en niveles intermedios. (Chopra, 2012)

Este aumento de rigidez generado por los 8 muros estructurales de 0.25m de espesor que se adicionan en cada planta del diseño, se ve reflejado en los períodos fundamentales de vibración obtenidos, donde el modelo diseñado con AIS 114-17 presenta valores menores en comparación con el modelo NSR-10, confirmando la influencia directa de la rigidez en la respuesta dinámica y en la forma de la deriva.

Periodos de vibración		
Modo	**AIS 114-17**	**NSR-10**
1	0.3873	0.5451
2	0.3630	0.5323
3	0.3217	0.4646

Tabla 31

Si se verifica el porcentaje de cortante basal en el diseño con muros estructurales (diseño con AIS 114-17) se obtienen los siguientes resultados de la distribución por piso:

Cortante basal Eje X			**Cortante basal Eje Y**		
Nivel	**Elementos**	**% De cortante basal**	**Nivel**	**Elementos**	**% De cortante basal**
1	Muros	91,00%	1	Muros	93,00%
	Columnas	9,00%		Columnas	7,00%
2	Muros	83,00%	2	Muras	88,00%
	Columnas	17,00%		Columnas	12,00%
3	Muros	76,00%	3	Muros	83,00%
	Columnas	24,00%		Columnas	17,00%
4	Muros	66,00%	4	Muros	77,00%

	Columnas	34,00%
5	Muros	28,00%
	Columnas	72,00%

Tabla 32

	Columnas	23,00%
5	Muros	51,00%
	Columnas	49,00%

Tabla 33

Para este caso se revisaron los porcentajes con la aplicación de la fuerza horizontal equivalente y los resultados son consistentes con que la mayor deriva se presente en la base del último piso ya que es cuando el mayor porcentaje de cortante basal lo resisten las columnas.

11.3. Cantidades de obra

Las cantidades de obra se calculan como un indicador del costo estructural. Para realizar una comparación más detallada entre los diseños, se presentan los consumos totales de concreto y de acero de refuerzo para cada tipo de elemento, junto con su porcentaje de participación en el total de la edificación. Adicionalmente, se analiza la relación entre concreto y acero como un parámetro que permite identificar el nivel de refuerzo que demanda cada sección estructural, en función de las solicitaciones aplicadas y del comportamiento esperado de los elementos dentro del sistema estructural.

Los resultados mostrados a continuación se agrupan en 3 o 4 ítems dependiendo de la normativa, columnas, muros, vigas y zapatas

Los resultados mostrados a continuación se agrupan en 3 o 4 ítems dependiendo de la normativa, columnas, muros, vigas y aunque las zapatas no forman parte del sistema estructural sismorresistente; sin embargo, son elementos fundamentales para garantizar la estabilidad de la edificación, ya que transmiten al suelo las fuerzas generadas por el sismo y deben diseñarse para resistir las combinaciones sísmicas sin presentar falla por capacidad portante, volcamiento o deslizamiento, (Ver anexo 1. “Planos y cantidades de obra”)

Rendimiento del acero NSR-10			
Elemento	**Volumen concreto (M3)**	**Acero por elemento(KG)**	**Rendimiento (KG/M3)**
Columnas	61.56	9898.95	158.73
Vigas	115.55	13899.74	120.29
Zapata	70.56	3507.04	49.70
TOTAL	**247.67**	**27305.73**	

Tabla 34

Resumen acero por elemento y diámetro NSR-10

Elemento/Diámetro	3/4¨	5/8¨	1/2¨	3/8¨	
COLUMNAS	4,692.40			5,226.70	9,919.10
VIGAS SECUNDARIA		4,642.00		2,247.20	6,889.20
VIGAS PRINCIPALES		2,183.70	1,386.60	3,419.10	6,989.40
ZAPATAS	3,503.20				3,503.20
SUMAS	8,195.60	6,825.70	1,386.60	10,893.00	27,300.90

Tabla 35

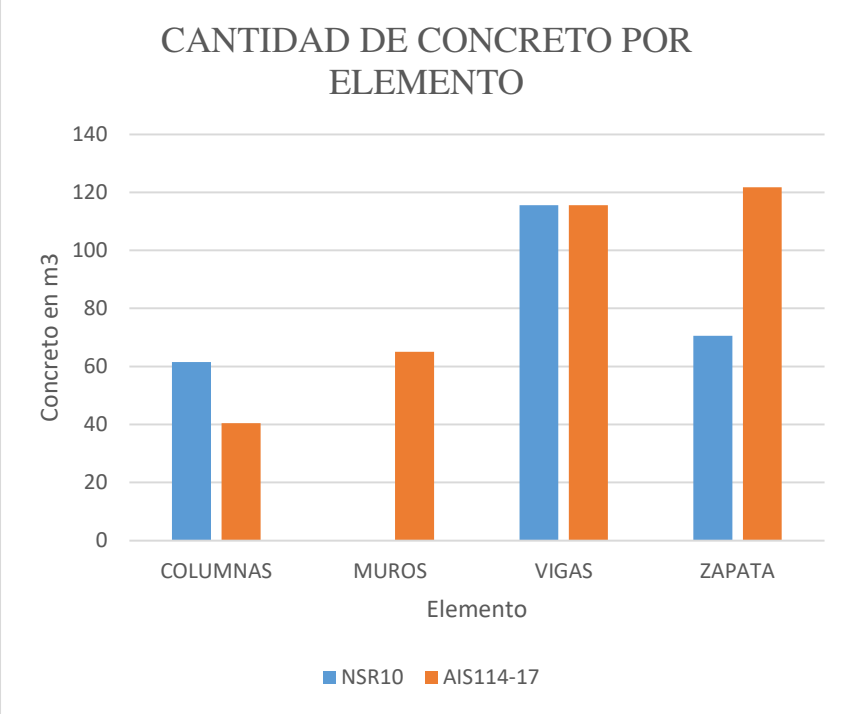


Figura 26. Cantidad de concreto por elemento.

Rendimiento del acero AIS 114-17			
Elemento	**Volumen concreto (M3)**	**Acero por elemento (KG)**	**Rendimiento (KG/M3)**
Columnas	40.51	11124.07	274.59
Muros	65.09	6085.48	93.49
Vigas	115.55	10209.26	88.35
Zapata	121.79	4768.00	39.15
TOTAL	**342.94**	**32186.81**	

Tabla 36

Resumen acero por elemento y diámetro AIS 114-17

Elemento/Diámetro	7/8¨	3/4¨	5/8¨	1/2¨	3/8¨	
COLUMNAS TIPO 1	2,897.00				1,029.00	3,926.00
COLUMNAS TIPO 2			4,310.80		2,887.30	7,198.10
VIGAS SECUNDARIA			3,189.40		1,729.70	4,919.10
VIGAS PRINCIPALES			3,389.60		1,923.30	5,312.90
ZAPATAS	795.80	3,890.00		78.70		4,764.50
MUROS			1,880.30		4,205.20	6,085.50
SUMAS	3,692.80	3,890.00	12,770.10	78.70	11,774.50	32,206.10

Tabla 37

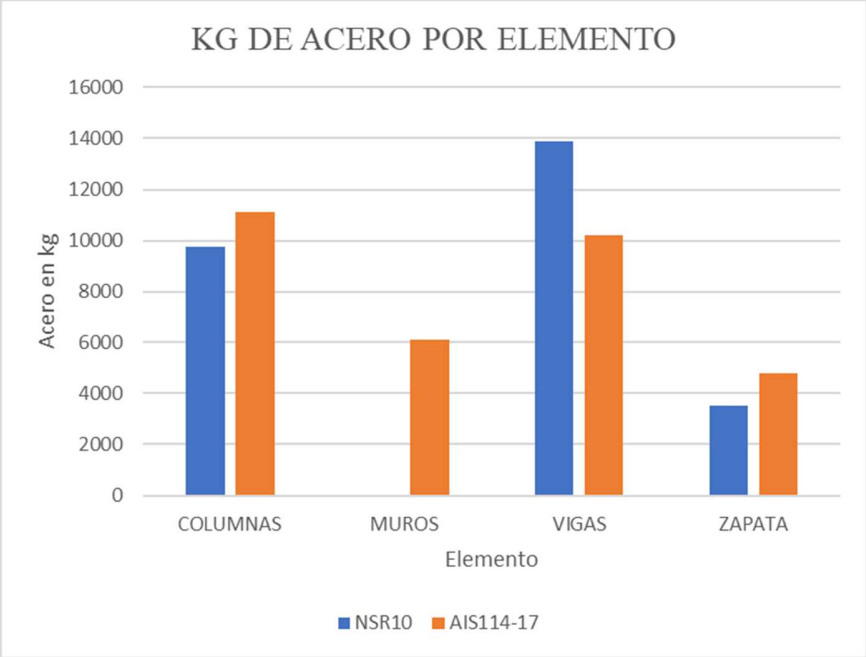


Figura 27. kilogramos de acero por elemento.

Los resultados muestran que el uso de la AIS 114-17 conduce a un incremento del **38%** en las cantidades de concreto con respecto a la NSR-10, debido principalmente a la incorporación de muros estructurales y al mayor volumen requerido en las zapatas para satisfacer los requisitos de rigidez y continuidad del sistema (se diseñan zapatas no solo para las columnas sino zapatas corridas para el uso de los muros estructurales), por este mismo hecho se evidencia una reducción de la sección transversal de las columnas, ya que los muros estructurales absorben una gran parte de las fuerzas laterales con las que se diseña el sistema.

En conjunto, este comportamiento confirma que el mayor consumo de concreto es el factor dominante que diferencia los dos diseños, evidenciando que la AIS 114-17 promueve un sistema estructural más robusto, rígido y estable frente a las fuerzas laterales.

La distribución del acero de refuerzo en el caso del diseño conforme a la NSR-10, la mayor cantidad de acero se concentra en las vigas, lo que evidencia que el sistema resistente depende principalmente del trabajo a flexión de los pórticos. Las columnas también presentan una cantidad considerable de refuerzo, coherente con un sistema donde estos elementos participan activamente en la resistencia lateral. Aunque en el diseño conforme a la AIS 114-17 las columnas presentan una mayor cantidad de acero respecto al diseño NSR-10, este comportamiento no implica necesariamente mayores solicitaciones sísmicas en dichos elementos, al disminuir el área de concreto, la capacidad resistente a compresión de la sección también se reduce, en consecuencia, el aumento de acero en columnas responde a un ajuste de diseño por reducción de sección y no a un incremento de la demanda sísmica.

En el diseño realizado con la AIS 114-17 se observa una redistribución del acero dentro de la estructura. Aparece un consumo significativo de acero en muros estructurales, mientras que las vigas reducen notablemente su cuantía de refuerzo. Esto indica que parte importante de las fuerzas sísmicas deja de ser resistida por los pórticos y pasa a ser tomada por los muros estructurales.

En la cimentación el consumo de acero aumenta ligeramente, asociado al incremento de fuerzas transmitidas por los muros estructurales que requieren de una cimentación más robusta

11.4 Análisis no lineal - Pushover

Posterior al análisis lineal y al diseño de los elementos estructurales, se realizó un análisis no lineal estático tipo pushover, con el fin de evaluar el desempeño sísmico y la capacidad inelástica de ambas estructuras supuestas: la NSR-10 y la AIS 114-17, para ello se asignaron rótulas plásticas a los elementos estructurales principales, específicamente en vigas y columnas, con el objetivo de representar el comportamiento no lineal del concreto reforzado, considerando la formación progresiva de daño, fluencia del acero y degradación de rigidez y resistencia.

El análisis pushover se llevó a cabo mediante la aplicación de un patrón de fuerzas laterales equivalentes, definido con base en el primer modo de vibración de la estructura, el cual concentra más del 75 % de la participación modal de masas, razón por la cual se considera representativo del comportamiento dinámico global del sistema estructural. Este criterio es consistente con las recomendaciones establecidas en documentos internacionales como FEMA 356 y ATC-40, comúnmente adoptados en estudios de desempeño sísmico.

El análisis se realizó mediante un criterio de desplazamiento, tomando como nodo de control aquel ubicado en el centro de masas del nivel de cubierta, ya que este punto representa adecuadamente el desplazamiento global de la estructura ante acciones sísmicas. Para establecer el desplazamiento objetivo usamos lo dicho en el apéndice A-3 de la NSR-10 que especifica que el análisis no debe detenerse hasta que se cumpla por lo menos el 150% del desplazamiento objetivo calculado con A-3.2.2

$$\delta_T = C_0 C_1 S_a \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 g \qquad \text{(A-3.2-2)}$$

Después de ejecutar el análisis, el programa MIDAS Gen determinó las curvas de desempeño donde se evidencia la plastificación de los elementos estructurales, así como su pérdida de resistencia y el punto de desempeño mediante el procedimiento establecido en FEMA, a partir de la intersección entre el espectro de capacidad y el espectro de demanda.

La gráfica del punto de desempeño presenta la relación entre la capacidad no lineal de la estructura y la demanda sísmica expresada en formato aceleración–desplazamiento, mediante la reducción del sistema estructural de múltiples grados de libertad (MDOF) a un sistema equivalente de un grado de libertad (SDOF), siguiendo el procedimiento establecido en FEMA 440, el desplazamiento espectral Sd puede interpretarse como el desplazamiento lateral global máximo esperado de la estructura bajo el sismo de diseño.

En la gráfica se observa la curva de capacidad obtenida del análisis pushover. El punto de desempeño se define como la intersección entre la curva de capacidad y la demanda espectral ajustada, constituyendo el estado de equilibrio que determina el desplazamiento máximo esperado y el nivel de desempeño alcanzado por la estructura.

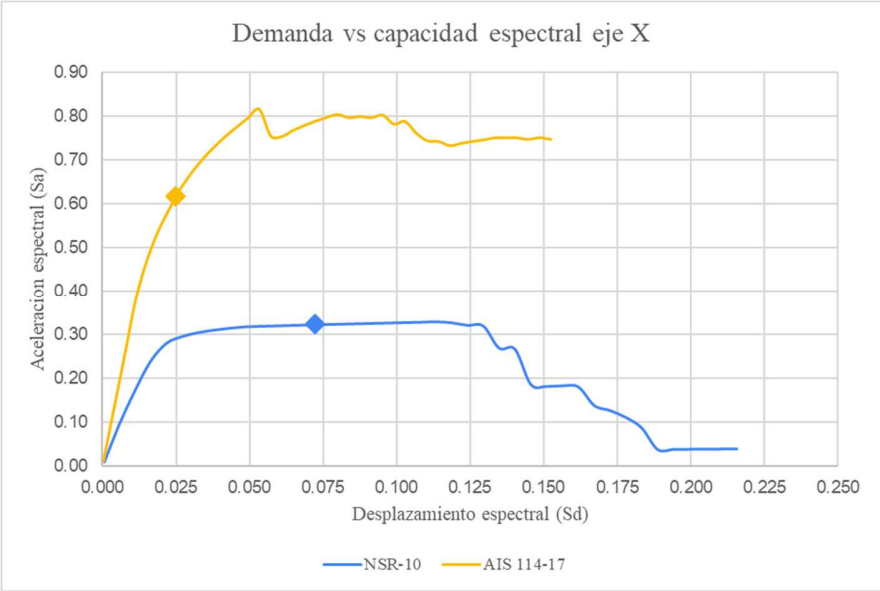


Figura 28. Curvas de capacidad Eje X

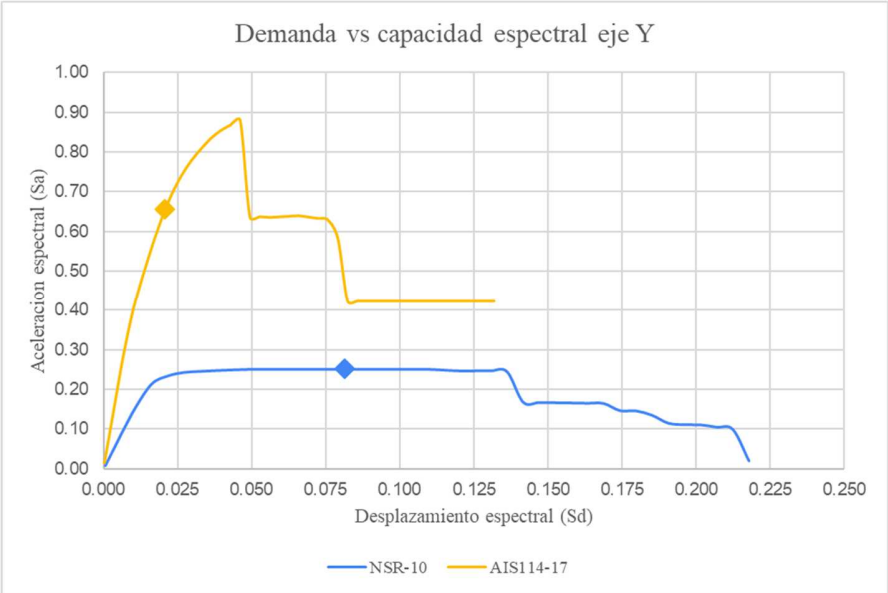


Figura 29. Curvas de capacidad Eje Y

En el caso evaluado con la AIS 114-17 la estructura alcanza el equilibrio demanda–capacidad con desplazamientos relativamente bajos y elevados niveles de aceleración espectral, lo que indica que el sistema controla la respuesta sísmica principalmente mediante rigidez lateral, limitando la demanda de deformación global. Por su parte, la estructura diseñada según la NSR-10 sin muros estructurales alcanza el equilibrio con desplazamientos considerablemente mayores y menores aceleraciones espectrales, lo que implica una mayor incursión en el rango inelástico antes de satisfacer la demanda sísmica. La presencia de una meseta prolongada en la curva de capacidad refleja que el desempeño se logra a través de una evolución progresiva del daño, con una participación más amplia de rótulas plásticas distribuidas en la estructura.

Comparativamente, el modelo bajo AIS 114-17 presenta un punto de desempeño caracterizado por mayor capacidad resistente y menor demanda de desplazamiento, lo que refleja un mejor control de derivas globales. En contraste, el modelo bajo NSR-10 desarrolla una respuesta más flexible, alcanzando el punto de desempeño dentro de un rango de desplazamientos más elevado y con menores niveles de aceleración espectral.

Bajo estas condiciones el modelo evaluado con los lineamientos de la AIS 114-17, presentaría un estado global compatible con un nivel de Ocupación Inmediata (IO) o en un escenario ligeramente más exigente, dentro del rango de Seguridad de Vida (LS). Esto implica que, tras el sismo, la estructura conservaría su estabilidad, presentaría daños estructurales limitados y mantendría un adecuado margen de seguridad frente al colapso, siendo potencialmente reparable sin intervenciones mayores.

En contraste, la estructura diseñada únicamente con pórticos conforme a la NSR-10, la condición estructural posterior al evento sísmico sería más consistente con un nivel de

Seguridad de Vida (LS), con posibilidad de aproximarse al umbral de Prevención de Colapso (CP) dependiendo de la distribución real del daño. Esto implica que, aunque la edificación mantendría la estabilidad global y evitaría el colapso, presentaría daños estructurales significativos, mayores derivas y una reducción más marcada de su rigidez residual, requiriendo reparaciones importantes antes de recuperar su funcionalidad.

Analizando las curvas de capacidad a mayor detalle, los puntos críticos como los puntos de fluencia o puntos donde se evidencia una pérdida de rigidez de la estructura se observa lo siguiente:

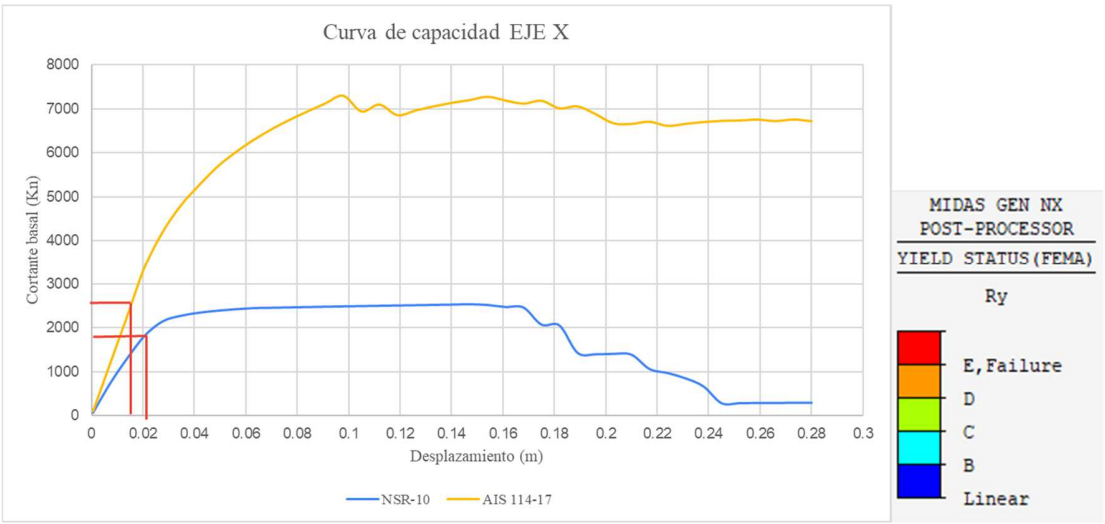


Figura 30. Punto de fluencia de la estructura en el eje X

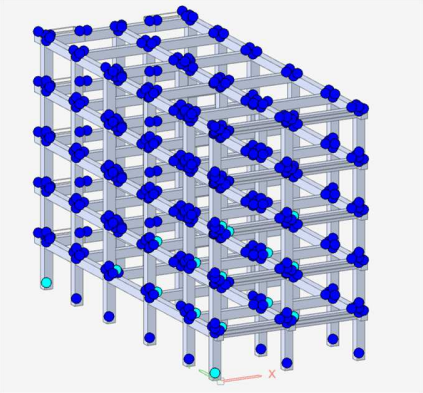


Figura 31a. Rotulas eje X sistema aporticado (NSR)

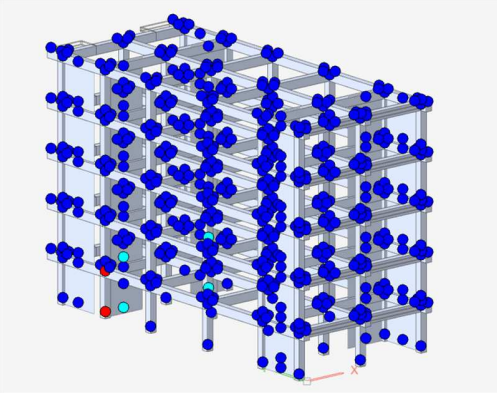


Figura 31b. Rotulas eje X sistema combinado (AIS)

En este caso, revisando el paso número tres del pushover con cada normativa, los valores obtenidos son:

- NSR-10: Cortante basal = 1836 Kn ; Desplazamiento = 0.021m
- AIS 114-17: Cortante basal = 3431 Kn ; Desplazamiento = 0.016m

Al revisar la fluencia de las rótulas plásticas se evidencia como en la estructura diseñada bajo la NSR-10 los elementos que primero comienzan su plasticidad son las vigas de carga del nivel +2.8m y las columnas 3A y 3F en la base de la estructura.

Por otro lado, en la estructura con los lineamientos de la AIS 114-17 a pesar de que sus elementos chequean con el diseño estructural realizado, ante la presencia del sismo de diseño, la estructura presenta un daño considerable en la columna 3E y fluencia en los muros del eje E; uno de los beneficios de este análisis es evidenciar que elementos estructurales deberían reforzarse en caso de estos eventos sísmicos o fuerzas externas que se evalúen.

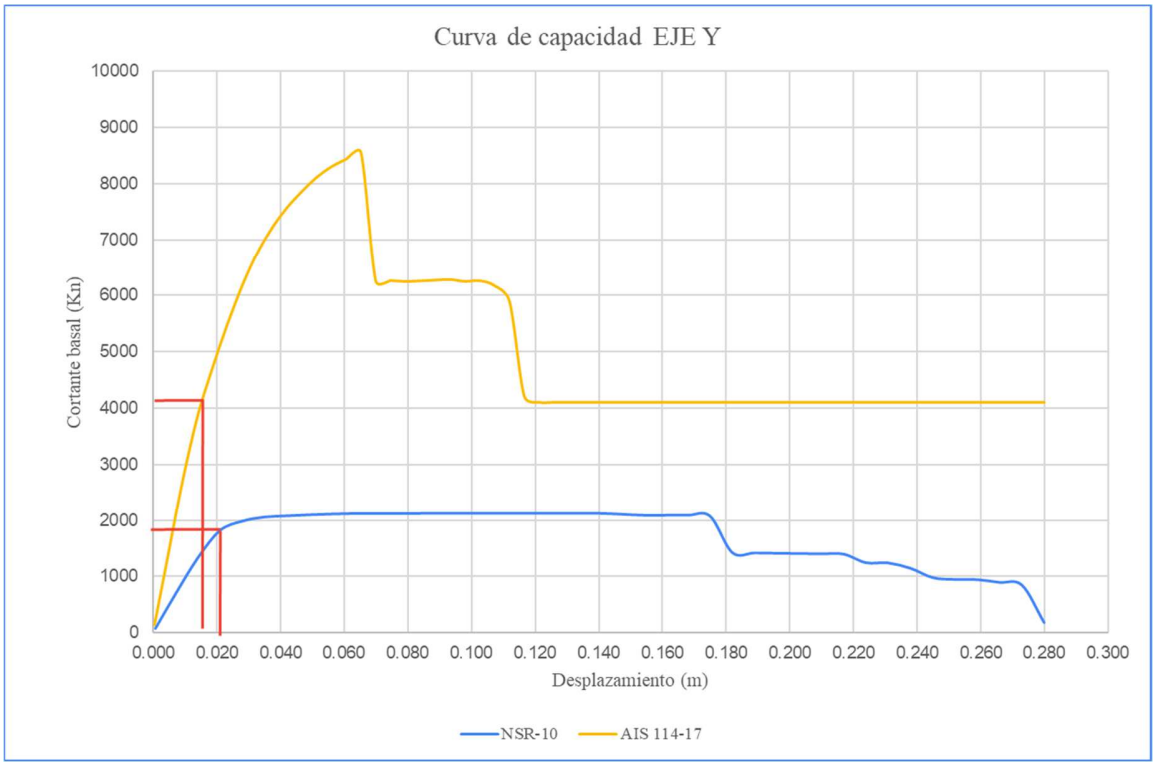


Figura 32. Punto de fluencia de la estructura en el eje Y

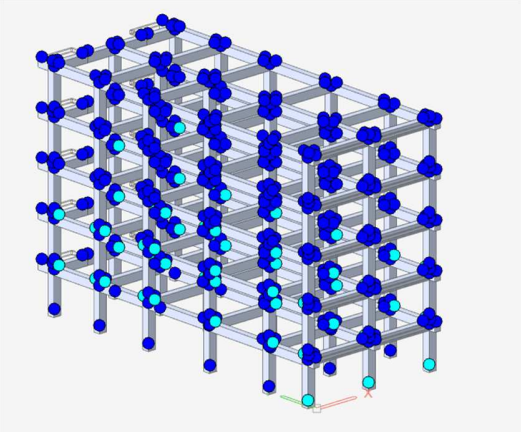


Figura 33a. Rotulas eje Y sistema aporticado (NSR)

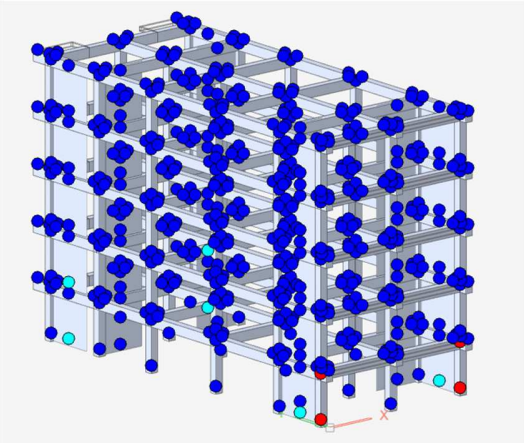


Figura 33b. Rotulas eje Y sistema combinado (AIS)

Cuando se revisa el paso número tres del pushover con cada normativa, los valores obtenidos para el eje Y son:

- NSR-10: Cortante basal = 1811 Kn ; Desplazamiento = 0.021m
- AIS 114-17: Cortante basal = 3856 Kn ; Desplazamiento = 0.014m

En la fluencia de las rótulas plásticas se evidencia como en la estructura diseñada bajo la NSR-10 los elementos que primero comienzan su plasticidad son las vigas secundarias del nivel +2.8m y las columnas del eje A en la base de la estructura.

En la estructura diseñada con la AIS 114-17 a pesar de que sus elementos chequean con el diseño estructural realizado, ante la presencia del sismo de diseño, la estructura presenta un daño considerable en las columnas 1A y 3A, también se evidencia cómo entran en fluencia los muros de los ejes 1 y 3.

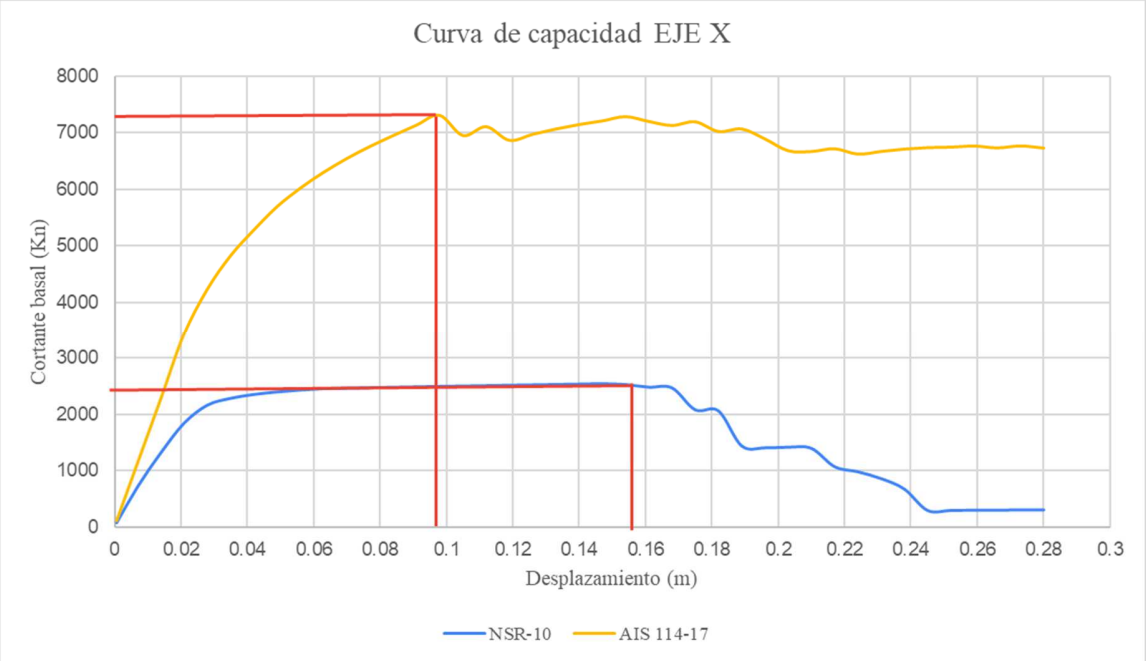


Figura 34. Punto de prevención del colapso de la estructura en el eje X

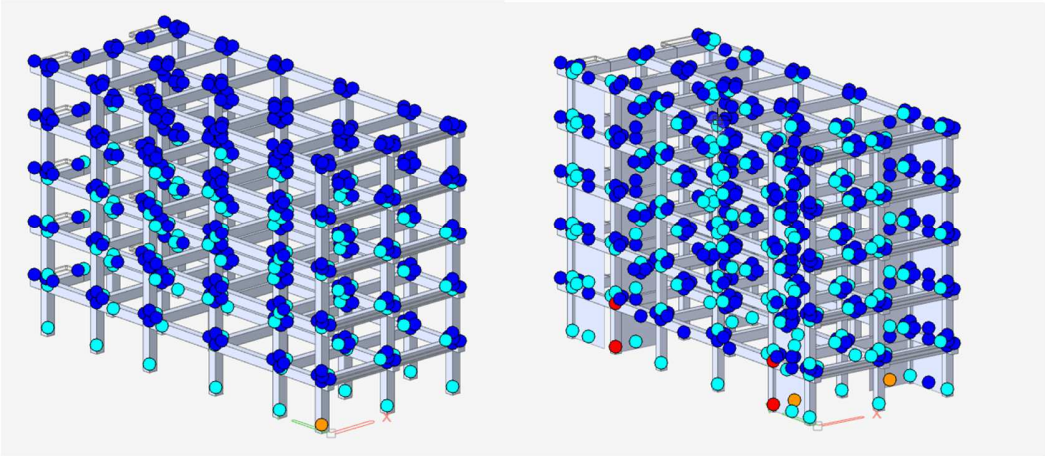


Figura 35a. Rotulas eje X sistema aporticado (NSR)

Figura 35b. Rotulas eje X sistema combinado (AIS)

En este caso, cuando se revisa el punto donde comienza la pérdida de rigidez del pushover con cada normativa, los valores obtenidos para el eje X son:

- NSR-10: Cortante basal = 2535 Kn ; Desplazamiento = 0.021m
- AIS 114-17: Cortante basal = 7304 Kn ; Desplazamiento = 0.098m

Al revisar la fluencia de las rótulas plásticas, se evidencia como en la estructura diseñada bajo la NSR-10 el elemento que primero registra una pérdida de resistencia es la columna 3A en su base, también hay fluencia en todas las bases de las columnas y en las vigas principales hasta el nivel +11.2m.

Cuando se analiza la estructura bajo la AIS 114-17 se evidencia que además de la columna ya mencionada que tiene un daño considerable, también hay pérdida de resistencia en la columna 3B y ambos muros del eje B, por otro lado las bases de las columnas y todas las vigas principales presentan fluencia.

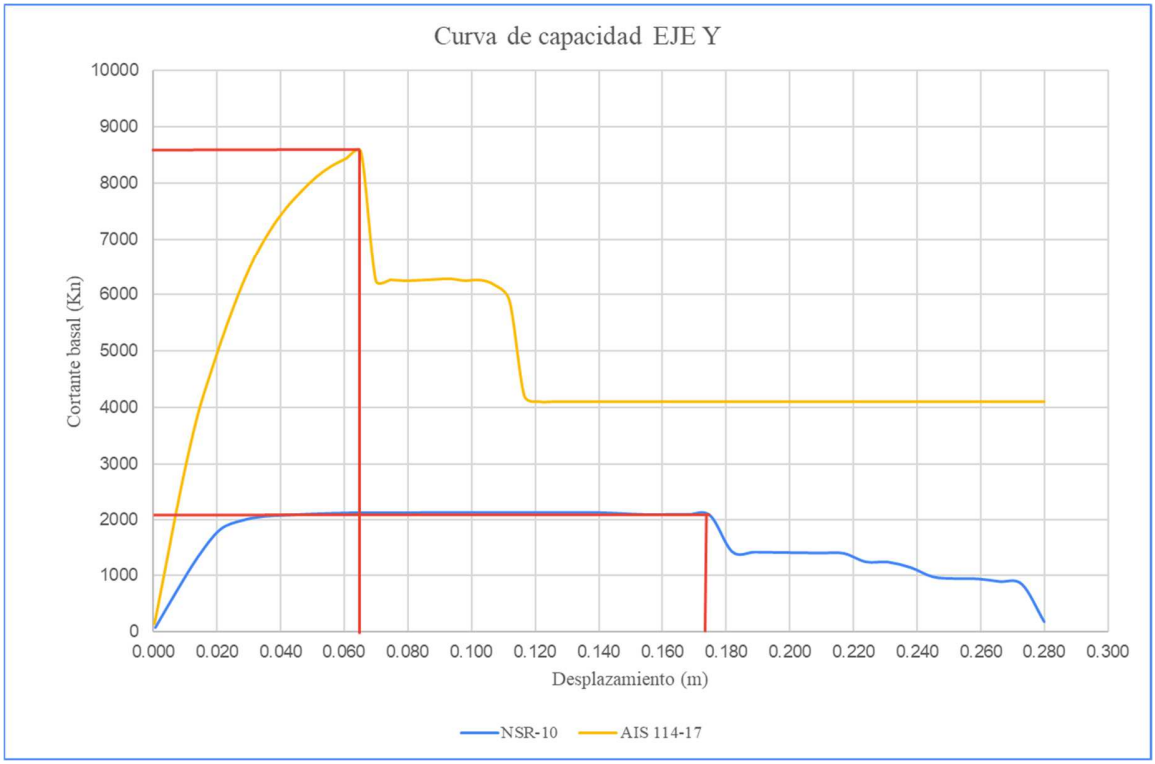


Figura 36. Punto de prevención del colapso de la estructura en el eje Y

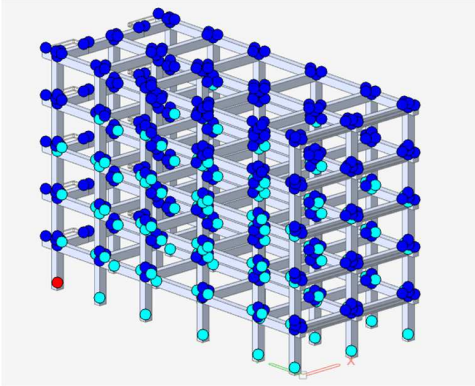


Figura 37a. Rotulas eje Y sistema aporticado (NSR)

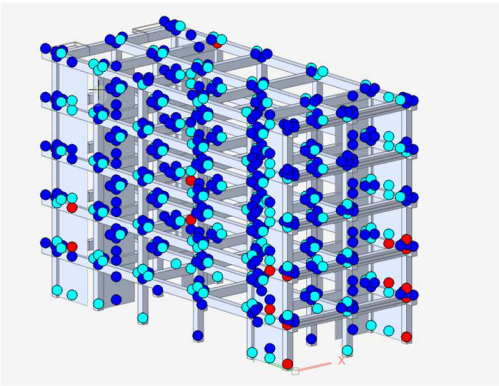


Figura 37b. Rotulas eje Y sistema combinado (AIS)

Finalmente cuando se revisa el punto donde comienza la pérdida de rigidez del pushover con cada normativa, los valores obtenidos para el eje Y son:

- NSR-10: Cortante basal = 2116 Kn ; Desplazamiento = 0.021m
- AIS 114-17: Cortante basal = 8557 Kn ; Desplazamiento = 0.065m

Se evidencia como en la estructura diseñada bajo la NSR-10, el elemento que primero registra una pérdida significativa de resistencia es la columna 3F en su base, también se evidencia la fluencia todas las bases de las columnas y de las vigas secundarias hasta el nivel +11.2m.

Cuando se analiza la estructura bajo la AIS 114-17 se evidencia que en las columnas 1A y 3A el daño se presenta hasta el nivel +3.6m, también hay pérdida de resistencia en los muros del nivel +2.8 de los ejes 1 y 3, a su vez, todas las vigas secundarias presentan fluencia.

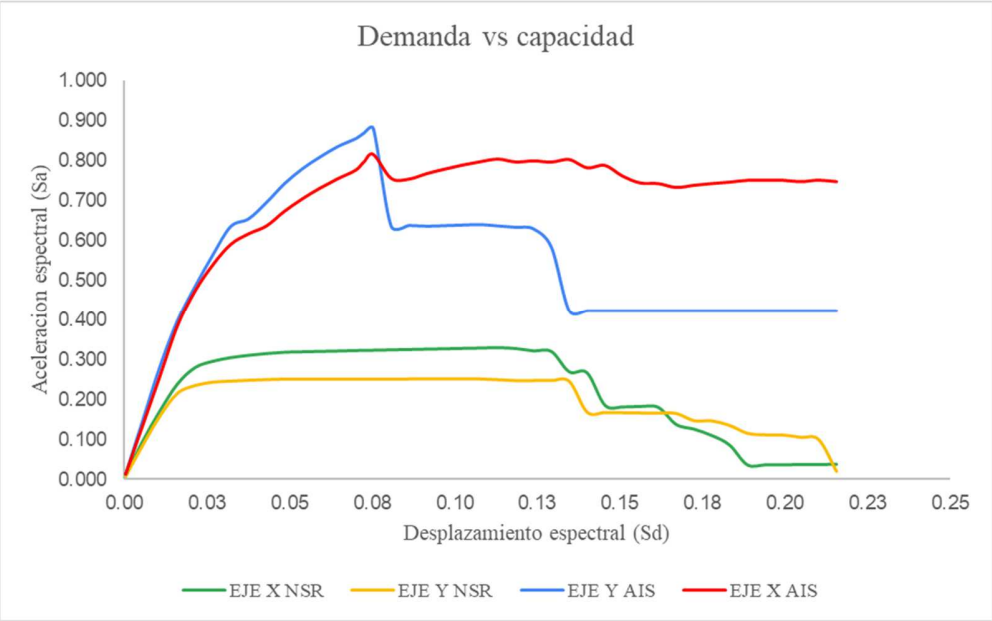


Figura 38. Curvas de capacidad

En el sistema aporticado (NSR-10), la formación de rótulas plásticas se distribuye de manera más uniforme a lo largo de la altura, predominando estados intermedios antes de alcanzar condiciones críticas. La plastificación se desarrolla progresivamente, lo que se traduce en una degradación de rigidez gradual y en una transición más controlada entre el comportamiento elástico y el inelástico. Este patrón indica que la estructura disipa energía de forma más repartida, evitando concentraciones severas de daño en etapas tempranas.

Por su parte, el sistema combinado (AIS 114-17) alcanza valores de cortante basal significativamente mayores antes de iniciar la plastificación, confirmando su mayor rigidez y capacidad resistente global. Sin embargo, una vez superado el rango elástico, la aparición de rótulas en estados avanzados se presenta de forma más concentrada, especialmente en ciertos elementos críticos. Esta concentración de daño ocurre aun cuando la estructura globalmente se encuentra cercana al inicio de fluencia, lo que evidencia una transición más abrupta en la pérdida de rigidez.

En términos estructurales, esto implica que el sistema combinado ofrece un mejor control de desplazamientos y mayor capacidad resistente, pero desarrolla mecanismos locales más exigentes cuando inicia la no linealidad. La pérdida de rigidez posterior a la fluencia tiende a ser más pronunciada, lo que puede inducir mayores redistribuciones internas de esfuerzos y potencial afectación de elementos estructurales y no estructurales, se sugiere en este caso modificar el diseño de los elementos estructurales que presentan una pérdida de rigidez temprana.

12. CONCLUSIONES

- En conjunto, los resultados confirman que la elección de la normativa de diseño influye de manera significativa en la distribución de esfuerzos y en la capacidad efectiva de los elementos estructurales. El diseño conforme a la AIS 114-17 conduce a un comportamiento más conservador, caracterizado por menores demandas relativas, mayor control de deformaciones y amplios márgenes entre demanda y capacidad, mientras que la NSR-10 prioriza un equilibrio entre seguridad estructural y eficiencia en el aprovechamiento de los materiales, esto se evidencia cuando en promedio los valores de ISE para las vigas principales son un 10% mayores en la NSR-10 permitiendo mayor deformación y desempeño de las mismas.

- La AIS 114-17 genera estructuras más rígidas y con menores derivas, a costa de un aumento significativo del volumen de concreto y una redistribución del acero que depende del rol de cada elemento dentro del sistema resistente. No se trata de un incremento homogéneo de materiales, sino de una reorganización interna de la demanda estructural, donde algunos elementos asumen mayor responsabilidad (columnas y muros), mientras otros requieren menos refuerzo para un desempeño equivalente (losas y zapatas). En este caso los muros estructurales pasan a tomar aproximadamente el 70% de la cortante basal, evidenciando una gran redistribución de esfuerzos en todo el sistema.

- La aplicación de las diferentes normativas influye no solo en la magnitud absoluta de la deriva, sino también en la distribución de esta a lo largo de la altura, por lo que la ubicación del nivel crítico constituye un indicador directo de cómo cada reglamento afecta la rigidez, y el desempeño sísmico del edificio. Para el nivel más crítico en la NSR-10 el porcentaje de deriva llega a ser 69% mayor con respecto a la AIS 114-17.

- En términos globales, el modelo evaluado con AIS 114-17 desarrolló mayores valores de cortante basal en ambos ejes principales, 3 veces aproximadamente en el eje X y 4 veces en el eje Y, lo que confirma una mayor rigidez inicial y una capacidad resistente superior. Sin embargo, esta mayor resistencia no implica necesariamente un comportamiento inelástico más favorable ya que la estructura presenta pérdidas de rigidez muy pronunciadas, por su parte la estructura con la NSR-10 con menor rigidez desarrolló una respuesta inelástica más progresiva. La formación de rótulas plásticas se dio de manera más distribuida y con una pérdida de rigidez gradual.

- El análisis pushover no solo permitió verificar la suficiencia resistente del sistema estructural, sino también comprender el mecanismo de comportamiento inelástico, identificar posibles concentraciones de daño y evaluar el control de la rigidez post-fluencia. De esta manera, el punto de desempeño se convierte en un indicador integral del comportamiento sísmico esperado, integrando capacidad, demanda y nivel de daño dentro de un mismo marco de evaluación estructural.

- Aunque el diseño conforme a AIS 114-17 produce estructuras más rígidas y con menores derivas, este nivel de desempeño supera ampliamente el mínimo exigido por la NSR-10 y no siempre se traduce en beneficios proporcionales en términos de eficiencia estructural o economía de materiales. No obstante, el análisis comparativo entre ambas normativas constituye una herramienta valiosa para los profesionales, pues permite entender cómo distintos criterios de rigidez, demanda y desempeño modifican la respuesta lateral del edificio, fortaleciendo así el criterio ingenieril y la capacidad de seleccionar la normativa más adecuada para cada proyecto

.

13. REFERENCIAS

Alzate, A. & Arenas, C. (2014). Proceso de diseño para edificios de concreto reforzado de 1 a 5 pisos, en el municipio de Pereira, basado en la ACI 318-02. (Tesis de pregrado). Universidad Libre.

Borja, F. A. (2011). Importancia del análisis por desempeño en el proceso de diseño de un edificio de hormigón armado para uso educativo, ubicado en la ciudad de cuenca-ecuador. (Tesis de pregrado). Universidad del Azuay.

Borrero, M. C. (2011). Estimación de la variabilidad de la deriva y del cortante basal resistente de pórticos de concreto reforzado en Bogotá. (Tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana

Braña, P. … & Martínez, J. O. (2022) Influencia de la altura en la consideración de la interacción dinámica suelo-estructura en edificaciones con tipología mixta ubicadas en zonas de alto peligro sísmico. *Ingeniería y desarrollo, 1(40),* 1-22. Universidad del Norte. Recuperado a partir de https://dx.doi.org/10.14482/inde.40.01.621.852.

Choque, V. S. y Huanca, E. E. (2022). Análisis estático no lineal incorporado al diseño sismo resistente del sector b del colegio especial hellen keller en ventanilla callao. (Tesis de pregrado). Universidad Cesar Vallejo.

Cubillos, J. L. (2021). Análisis comparativo para el diseño estructural de un edificio porticado con la normativa ACI318S-19 y el reglamento colombiano NSR-10. (Tesis de pregrado). Universidad distrital Francisco José de Caldas.

García, L. E. (2014). Desarrollo de la normativa sismo resistente colombiana en los 30 años desde su primera expedición1. *Revista De Ingeniería*, *1*(41), 71–77. Recuperado a partir de https://doi.org/10.16924/riua.v0i41.785.

Garmonal, M. & Yaipén, A. A. (2017). Evaluación del desempeño sísmico aplicando un análisis estático no lineal del hospital naylamp – essalud Chiclayo – Lambayeque (Tesis de pregrado). Universidad Cesar Vallejo.

Hernández, O. I. (2021). Comparación del desempeño sísmico mediante análisis estático no lineal (pushover) de dos edificaciones en concreto reforzado situadas en zona de amenaza sísmica alta con grado de disipación de energía des, diseñadas bajo los criterios del AIS 114-17 y la norma NSR-10. (Tesis de Maestría). Universidad Militar Nueva Granada.

Jaimes, D. F., García, J. J. & Rendón, J. J. (2020). Importancia del concreto en el campo de la construcción. *Formación Estratégica*, *2*(1), 1–13. Recuperado a partir de https://www.formacionestrategica.com/index.php/foes/article/view/18

Maldonado, E., & Amado Lamus, A. (2003). Estudio de demanda / capacidad sísmica del hospital integrado del municipio de Landazuri, Santander. *Revista UIS Ingenierías*, *2*(2), 95–104. Recuperado a partir de https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/2312.

Medina, R. y Music, J. (2018). Determinación del nivel de desempeño de un edificio habitacional estructurado en base a muros de hormigón armado y diseñado según normativa chilena. Obras y Proyectos 23, 63-77. Recuperado a partir de Https://www.ccc.org.co/inc/uploads/2022/02/Ritmo-Constructor-22.pdf.

Pardo, C. D. & Valero, M. A. (2016). Comparación del procedimiento de diseño y relación costo beneficio entre la NSR-10 y los requisitos esenciales en edificios de concreto reforzado basados en ACI 318-02. (Tesis de pregrado). Universidad Católica.

Quinatoa, J. G. (2022) Evolución histórica de las normativas de diseño sismo resistente en américa latina. casos de estudio: Colombia, Ecuador, Perú y Chile. (Tesis de pregrado). Universidad Nacional de Chimborazo.

Restrepo, D. (2024) Curvas momento rotación en midas Gen según el FEMA. MIDAS IT. Recuperado a partir de https://resource.midasuser.com/es/blog/curvas-momento-rotacion-fema

Lancheros, J. C. (s. f.) Diseño sísmico por desempeño. VALUATIVE

Paredes M. A. (2016) Evaluación del desempeño sismorresistente de un edificio destinado a vivienda en la ciudad de Lima aplicando el análisis estático no lineal pushover. (Tesis de pregrado). Universidad peruana de ciencias aplicadas