Revisión bibliográfica sobre las causas del colapso del edificio Space - Lecciones aprendidas

Andrés Felipe Escobar Hinestroza
Andrés Felipe Tamayo Cano

Monografía presentada para optar al título de Especialista en Análisis y Diseño de Estructuras

Asesor
Carlos Alberto Riveros Jerez, Doctor (PhD) of Engineering (Dr.Eng.)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	(Escobar Hinestroza & Tamayo Cano, 2024)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Escobar Hinestroza, A. F., & Tamayo Cano, A. F. (2024). *Revisión bibliográfica sobre las causas del colapso del edificio Space – Lecciones aprendidas* [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

creative commons BY NC SA

Especialización en Análisis y Diseño de Estructuras, Cohorte XI.

Grupo de Investigación Infraestructura (GII).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
Vicerrectoría de Docencia

Sistema de Bibliotecas

Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, fuente de mi inspiración y fortaleza, cuya guía ha iluminado cada paso de este camino, También dedico esta monografía a la memoria de mi querida madre, quien siempre creyó en mis sueños y me enseñó el valor del esfuerzo y la perseverancia. Su amor y apoyo incondicionales han sido el motor que me impulsa a seguir adelante. Aunque ya no esté físicamente conmigo, su espíritu vive en cada palabra y cada logro.

A ambos, mi eterno agradecimiento.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad de Antioquia por el invaluable conocimiento impartido a lo largo de mi formación. Cada clase, cada conferencia y cada interacción con los docentes han enriquecido mi aprendizaje y me han preparado para enfrentar los desafíos del futuro. Su dedicación y compromiso con la educación han dejado una huella profunda en mi vida.

A mis compañeros de clase, gracias por su apoyo, compañerismo y por compartir su sabiduría y experiencias. Cada día en el aula ha sido una oportunidad para aprender juntos, y valoro profundamente las discusiones y el intercambio de ideas que hemos tenido. Su colaboración ha sido fundamental para mi crecimiento académico y personal.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

Tabla de contenido

Resumen 7

Abstract 8

Introducción 9

1 Justificación 10

2 Objetivos 11

2.1 Objetivo general 11

2.2 Objetivos específicos 11

3 Revisión de literatura 12

3.1 Introducción 12

4 Resultados 21

4.1 Diagramas de momento - curvatura de la columna S3 21

5 Análisis de resultados y conclusiones 25

6 Recomendaciones 27

Referencias 28

Lista de tablas

Tabla 1 Casos de colapso por fallas estructurales – Elaboración propia.....20

Lista de figuras

Figura 1 Vista en planta del edificio Space (Yamin et al. 2018) 12

Figura 2 Vista en elevación del edificio Space (Yamin et al. 2018).....13

Figura 3 Fotos de la falla en la columna S-3 del edificio Space (Universidad de los Andes, 2014) 14

Figura 4 Sección de columna propuesta para el eje S3 en el nivel 4 de la torre 6 (Benitez, 2021) 16

Figura 5 Sección de columna propuesta para el eje S3 en el nivel 4 de la torre 6 (Benitez, 2021) 17

Figura 6 Evidencia de falla en columnas ante cargas gravitacionales en Zumrut, Turquía (Google). 18

Figura 7 Foto del desplome del L´Ambiance Plaza (Google).....19

Figura 8 Diagrama de momentos antes y después de la falla (Benitez 2021).....19

Figura 9 Sección de la columna S3 y sección con NSR-98. 21

Figura 10 Diagramas de momento - curvatura de la columna S3. 23

Figura 11 Modelos resultantes del programa Response.....24

Resumen

El colapso del edificio Space en Medellín, ocurrido el 12 de octubre de 2013, evidenció fallas críticas en las prácticas de diseño, construcción y supervisión en Colombia. Esta monografía realiza una revisión exhaustiva de las causas técnicas que condujeron al colapso, enfocándose en los errores de diseño estructural, mala colocación del acero de refuerzo y problemas en la cimentación. A través de un análisis bibliográfico y de simulaciones numéricas, se evalúan las deficiencias en el diseño de la columna S3, uno de los elementos que falló durante el colapso, comparando las prácticas reales con los estándares mínimos exigidos por el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-98). El estudio resalta la importancia de cumplir con las normativas de diseño estructural y la necesidad de una supervisión estricta en la construcción de edificaciones. Las lecciones aprendidas a partir de este evento buscan mejorar la seguridad y durabilidad de futuras estructuras en el territorio colombiano.

Abstract

The collapse of the Space building in Medellín on October 12, 2013, exposed critical failures in the design, construction, and supervision practices prevalent in Colombia. This monograph offers a thorough investigation of the technical causes that led to this tragic event, with a primary focus on significant structural design errors, improper placement of reinforcement steel, and various issues related to the foundation. Utilizing a combination of bibliographic analysis and numerical simulations, the study evaluates the deficiencies found in the design of column S3, which was one of the crucial elements that failed during the collapse. By comparing actual construction practices with the minimum standards established by the Colombian Earthquake Resistant Construction Regulation (NSR-98), this research emphasizes the urgent need for compliance with structural design norms. Moreover, it highlights the necessity for stringent supervision throughout the construction process to prevent similar disasters in the future. The insights and lessons learned from this unfortunate incident aim to enhance the safety, reliability, and durability of future construction projects across the Colombian territory

Introducción

El colapso del edificio Space puso en evidencia no solo las malas prácticas en diseño, construcción y supervisión, sino también una falta de rigurosidad en la aplicación de normativas de ingeniería estructural en Colombia. Este evento resalta la urgencia de revisar y fortalecer las normas para evitar futuros incidentes. En esta monografía, se investigarán las causas que llevaron al colapso del edificio, permitiendo identificar lecciones clave que mejoren la calidad y seguridad de las estructuras de concreto reforzado en Colombia. A través de este análisis, se busca contribuir a la adopción de buenas prácticas en la ingeniería estructural, reduciendo el riesgo de fallos graves que comprometan la vida útil de las edificaciones y la seguridad de los ocupantes.

1 Justificación

Las edificaciones de concreto reforzado juegan un papel fundamental en la economía colombiana, siendo el material más utilizado debido a su disponibilidad y bajo costo. No obstante, la discrepancia entre los diseños estructurales y su correcta ejecución en obra ha sido un factor recurrente de fallos en la construcción. Estas discrepancias suelen ser producto de la falta de conocimiento técnico, negligencia, o de la presión por reducir costos y acelerar tiempos de ejecución generando sobrecostos por mantenimientos y reparaciones posteriores. El análisis del caso Space subraya la necesidad de una ejecución rigurosa que respete los estándares de diseño y control, con el fin de evitar futuras fallas estructurales en el país.

Esta monografía está dirigida a ingenieros civiles y maestros de obra, con el objetivo de enfatizar la importancia de seguir rigurosamente los diseños estructurales. Se proporcionará una comprensión clara de los riesgos asociados con las desviaciones del diseño, realizando una exhaustiva revisión bibliográfica de uno de los casos más conocidos y polémicos en los últimos años en el territorio colombiano. La revisión del caso Space no solo ofrecerá lecciones importantes sobre las fallas y problemas que llevaron al colapso, sino que también destacará prácticas recomendadas y normativas necesarias para evitar la repetición de incidentes similares.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Realizar una revisión bibliográfica de las causas técnicas que originaron el colapso del edificio Space, estudiando los mecanismos de falla y generando estrategias tanto para el diseño como la construcción a partir de las lecciones aprendidas.

2.2 Objetivos específicos

- Estudiar el caso del edificio Space y analizarlo en detalle según el estado del arte en su diseño de concreto reforzado, evaluando sus elementos estructurales que presentaron deficiencias, las cargas que indujeron sus fallas y el mecanismo de colapso.

- Investigar documentación bibliográfica sobre edificaciones de concreto reforzado que hayan colapsado debido a su peso propio de la estructura sin incidencia de esfuerzos externos.

- Tipificar las causas y analizarlas técnicamente de acuerdo con el alcance de la información encontrada y el conocimiento actual de edificaciones de concreto reforzado.

- Se realizarán análisis seccionales para determinar la ductilidad de la columna S3 que falló y compararla con la sección que cumpliría la norma.

3 Revisión de literatura

3.1 Introducción

El colapso del edificio Space en la ciudad de Medellín el 12 de octubre de 2013 marcó un trágico evento que impactó no solo a la ciudad, sino también a todo el país y al mundo. Este suceso tuvo un impacto devastador tanto en términos humanos como económicos, y generó una profunda reflexión sobre las prácticas de diseño, construcción y supervisión de las edificaciones colombianas. Esta prominente estructura de 22 pisos, ubicada en el exclusivo barrio de El Poblado, no solo representaba un símbolo de modernidad y desarrollo urbano en Medellín, sino que también fue concebida como un ejemplo de ingeniería estructural avanzada debido a su particular diseño y forma, como se muestra en las figuras 1 y 2 (Gómez, 2019).

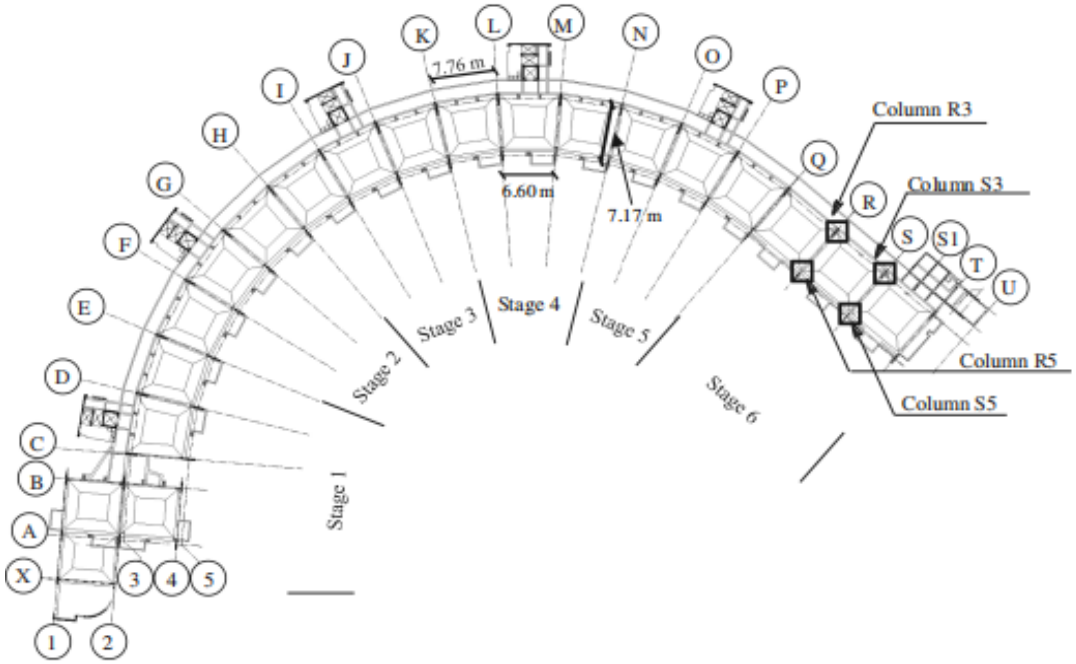


Figura 1 *Vista en planta del edificio Space (Yamin et al. 2018)*

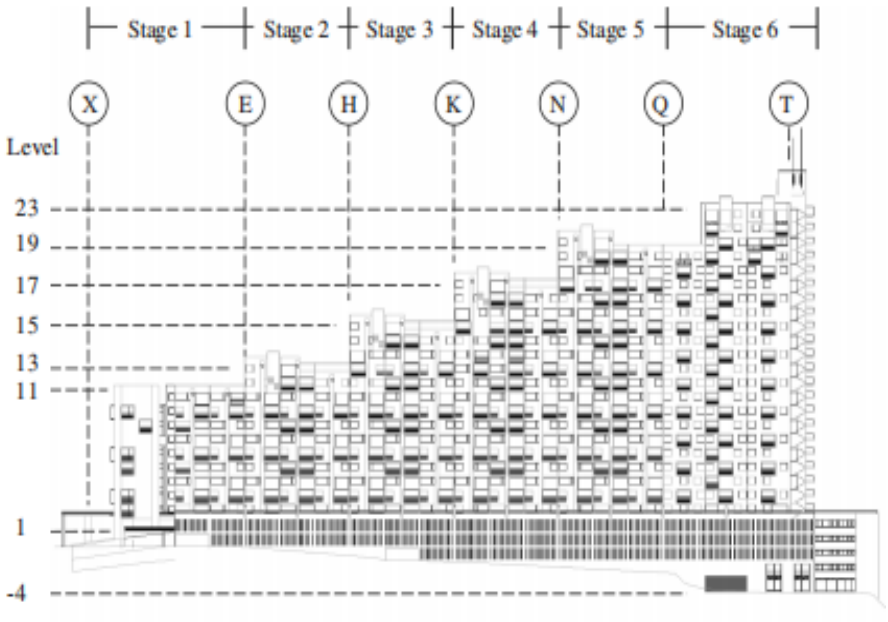


Figura 2 *Vista en elevación del edificio Space (Yamin et al. 2018)*

Sin embargo, su desplome repentino planteó serios interrogantes sobre las normativas y controles de los entes nacionales de construcción, la calidad de los materiales utilizados, los procesos de supervisión y las decisiones técnicas adoptadas durante su diseño y construcción.

El objetivo de esta monografía es realizar un análisis profundo y detallado del colapso, examinando las causas técnicas, los factores contextuales y las lecciones aprendidas que pueden derivarse de este desafortunado evento. A través de este estudio, se pretende contribuir al conocimiento y la comprensión de los desafíos asociados con la ingeniería estructural en entornos urbanos dinámicos como el de Medellín, proporcionando recomendaciones para fortalecer la seguridad y la sostenibilidad de las futuras edificaciones. En la figura 3, se puede observar la falla por cortante y compresión de la columna en el eje S3:



Figura 3 *Fotos de la falla en la columna S-3 del edificio Space (Universidad de los Andes, 2014)*

Durante el proceso constructivo suelen surgir errores debido a la falta de precisión en la interpretación de planos y especificaciones técnicas. Estos errores, como la colocación incorrecta del acero de refuerzo y los errores en la disposición del refuerzo, son una de las principales causas de fallos estructurales, destacando la necesidad de una supervisión estricta y un control de calidad riguroso en el sitio de construcción.

Calderón (2021) plantea que los errores en las estructuras de cimentación y muros son frecuentes en un 51.52%, encontrándose como errores más comunes en las actividades de cimentación el mal mezclado del concreto, que corresponde a un 15.15%, y el mal trazado y replanteo, que representa un 13.64%. Sin embargo, uno de los errores que más incidencia presenta en el diseño estructural es el mal armado del acero de refuerzo, específicamente la mala instalación de elementos tan importantes como los estribos, cuyo funcionamiento principal es resistir al cortante y confinar el núcleo del concreto reforzado.

Según el ACI (2011), la correlación entre los errores de diseño y los fallos en la ejecución puede reducirse significativamente mediante la implementación de programas de capacitación continua y la adopción de tecnologías avanzadas de modelado y simulación.

En este sentido, de acuerdo con el reglamento NSR-98, en el apartado C21.4.1, los requisitos geométricos para columnas construidas en estructuras de disipación de energía moderada

establecen que la mínima dimensión de una columna debe ser de 250 mm. Además, el porcentaje de refuerzo no debe ser menor al 1% de la sección de la columna. En el caso de la columna estudiada, el área de acero longitudinal fue de 2880 mm², correspondiente al 0.98% del área total de la sección de la columna. Aunque esta cifra está muy cerca del mínimo requerido, no alcanza el porcentaje mínimo de acero estipulado (Benitez, 2021).

Con respecto a los estribos, la NSR-98 en la sección C.7.10.3 (a) menciona que el diámetro mínimo de las barras de estribos para varillas longitudinales menores a Nº10 en una zona de disipación sísmica intermedia no debe ser menor a las barras Nº3 de 3/8". Adicionalmente, en la sección C.7.10.3 (b) se establece que el espaciamiento entre estribos debe ser menor a 16 diámetros de barra longitudinal, 48 diámetros de barra de estribo, o la menor dimensión de la columna.
Para el caso del edificio Space, ubicado en una zona sísmica intermedia, las columnas tenían una dimensión de 200 mm, lo cual no cumplía con la mínima dimensión requerida. Además, los estribos eran de diametro Nº2 o 1/4" y su separación era de 300 mm, incumpliendo así los requisitos de diámetro mínimo de barra de estribos y el espaciamiento establecido. La NSR-98 específica en el apartado C.7.10.3 que los estribos de barras Nº2 solo son permitidos en estructuras de disipación de energía mínima y de máximo dos pisos.

La figura 4 muestra la distribución de estribos de acuerdo con las secciones C.7.10.3 y C.21.4 de la NSR-98. En este caso, se usaron estribos Nº4 espaciados cada 210 mm para un nivel de disipación de energía moderado. Además, los elementos principales que conducen las cargas de las edificaciones al suelo son las columnas, elementos estructurales verticales cuya función principal es trabajar a flexo-compresión. El refuerzo dispuesto en ellas es precisamente para este propósito, además de reducir los efectos del flujo plástico y la retracción del concreto bajo cargas permanentes.

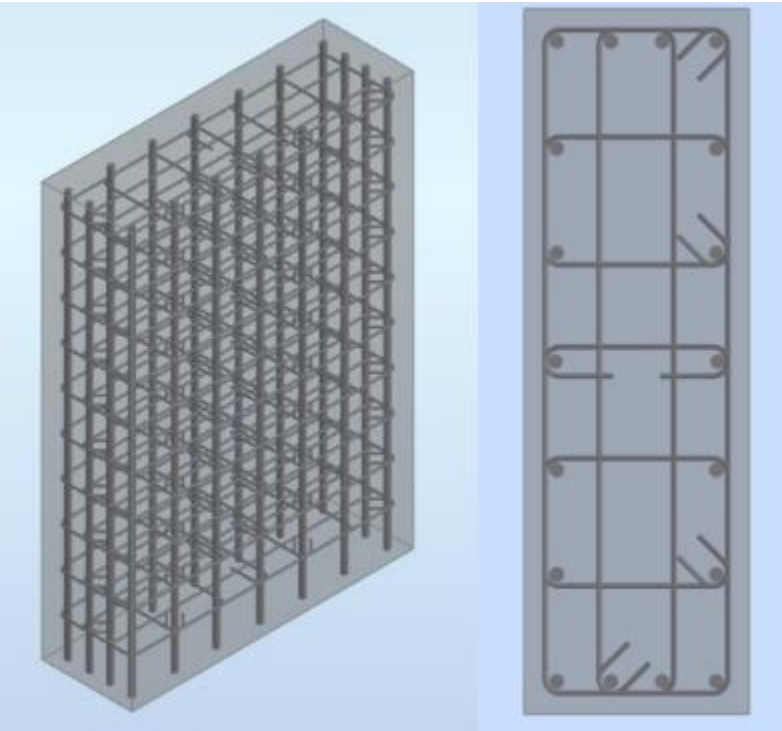


Figura 4 *Sección de columna propuesta para el eje S3 en el nivel 4 de la torre 6 (Benitez, 2021)*

Cabe mencionar que los factores Ø de reducción de resistencia son menores en columnas debido a las diversas implicaciones que conlleva la construcción de estos elementos. Según McCormac (p. 266), la falla en las columnas está directamente ligada a la resistencia última del concreto, la cual puede variar considerablemente. Cuando una columna se carga hasta su falla, parte del recubrimiento del refuerzo se desprenderá, y a menos que los estribos estén muy juntos, las varillas longitudinales se pandearán, causando fallas que pueden ser muy repentinas. En la práctica actual, después de que una columna pierde su recubrimiento, se considera que ha perdido toda su capacidad útil de servicio.

Posteriormente, las cargas que soportaba pasan a ser resistidas por las columnas vecinas debido a la deformación inducida por la falla. El acero de refuerzo en estribos permite que la falla de la columna sea dúctil, evitando así colapsos repentinos. En este contexto, la ecuación 1 se usa para calcular la resistencia última en la falla de las columnas cargadas axialmente, donde (Ag) es el área de la sección transversal total de la columna y (Ast) es el área de la sección transversal resultante de la suma de todo el refuerzo longitudinal de la sección.

Debido a que no existen columnas que trabajen únicamente a carga axial, sino que también experimentan esfuerzos a flexión, su diseño debe considerar una carga axial Pn y un momento Mn. Una columna sometida a una carga a una distancia (e) de su eje neutro genera un momento adicional a los esfuerzos axiales. Este momento tiende a comprimir uno de los lados de la columna en la dirección en que se aplica, dependiendo de la magnitud de esta carga axial y este momento, determinándose así la resistencia última de la columna. Esta interacción entre Pn (Esfuerzo o carga nominal) y Mn (Momento nominal) se representa mediante un diagrama de interacción, el cual muestra la envolvente de fallas que pueden ocurrir en la columna por flexo-compresión.

$$Pn = 0{,}85 f_c'(A_g - A_{st}) + f_y A_{st}$$

Ecuación N°1 Calculo carga nominal

Sin embargo, se evidenció que el proyecto Space, desde su etapa de estudios y diseños, presentaba deficiencias en su diseño estructural, como se muestra en la figura 5. Al comparar esto con el diseño y despiece estructural ilustrado en la figura 4, se notan diferencias considerables que debieron ser analizadas a profundidad por el equipo evaluador encargado de aprobar los estudios y diseños.

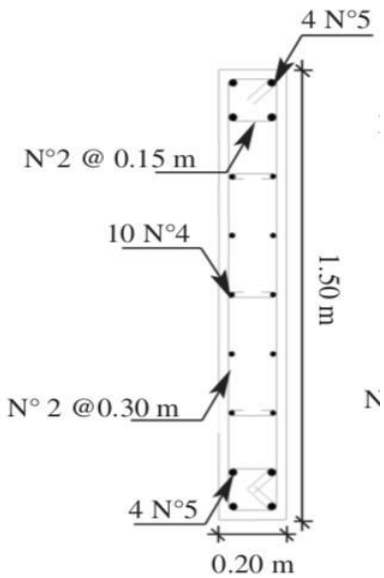


Figura 5 *Sección de columna propuesta para el eje S3 en el nivel 4 de la torre 6 (Benitez, 2021)*

Uno de los casos más investigados es el del edificio de apartamentos residenciales Zumrut, ubicado en la ciudad de Konya en Turquía. Esta edificación de concreto reforzado de 9 pisos de altura colapsó el 2 de febrero de 2004, dejando 92 personas fallecidas. Según lo documentado, las causas del colapso fueron errores de diseño y de construcción. Los errores en el diseño estructural se reflejaron en diferencias sustanciales entre las cargas reales y las cargas de diseño, espesores de sistemas de piso menores a los admisibles, refuerzos inadecuados e insuficientes y sobrecargas en el suelo, dejándonos imágenes que se muestran en la figura 6.



Figura 6 *Evidencia de falla en columnas ante cargas gravitacionales en Zumrut, Turquía (Google).*

De manera similar, el edificio L'Ambiance Plaza en Bridgeport, Connecticut, Estados Unidos, también experimentó un colapso durante su construcción. Esta edificación de dos torres para apartamentos y parqueaderos con 16 niveles colapsó el 23 de abril de 1987, quitándole la vida a 28 trabajadores como se muestra en la figura 7. Utilizaba un método de construcción de losa levadiza, que consiste en fundir las losas de hormigón una encima de la otra a nivel del suelo, y luego levantar las losas en sus posiciones finales mediante gatos hidráulicos montados en la parte superior de las columnas. Sus losas eran de concreto postensado apoyadas sobre columnas de acero.

La causa más probable del colapso, según las investigaciones, fue la pérdida de soporte en el techo del nivel 12, la inestabilidad de las cuñas que soportaban las losas debido a un inapropiado dimensionamiento del tamaño de las crucetas a cortantes en las losas y la pobre restricción de movimiento de las crucetas a cortante. Mal diseño y mala implementación del debido proceso

constructivo hicieron que el edificio se desplomara sin finalizar su construcción, como se muestra en la figura.



Figura 7 *Foto del desplome del L´Ambiance Plaza (Google).*

Asimismo, las causas más probables del colapso en ambos casos comparten factores similares. La investigación bibliográfica resalta que la causa principal del colapso fue la deficiente capacidad estructural de las columnas principales de los edificios. En particular, el análisis indicó que las cargas de servicio que actuaban sobre las columnas R3 y S3 en el momento del colapso superaron su máxima capacidad de compresión y la sobrecarga generada por la falla de la columna S-3, como se muestra en la figura 8.

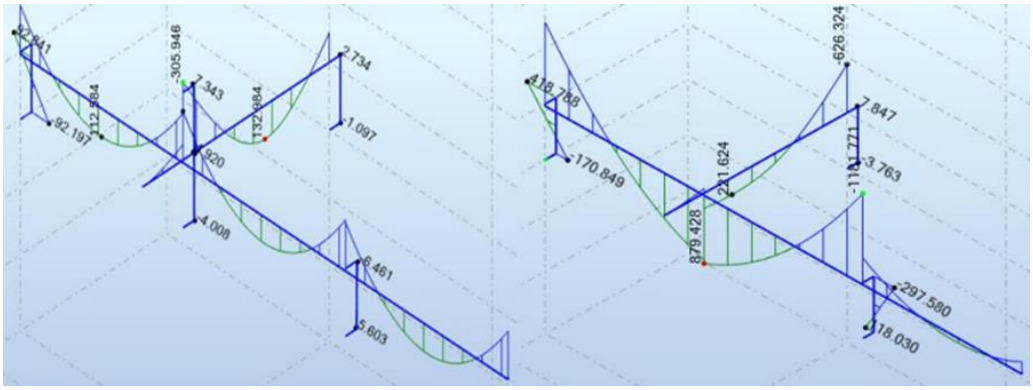


Figura 8 *Diagrama de momentos antes y después de la falla (Benitez 2021)*

Los autores consideran que, si los edificios que se relacionan en la Tabla 1 hubieran sido diseñados adecuadamente utilizando los códigos de diseño de edificios (NSR o ACI) disponibles en ese momento, no habrían colapsado. Además, hay evidencia de que ambos edificios presentaban problemas y patologías estructurales internas en los meses y días previos al colapso, los cuales incluían fisuras y grietas en muros divisorios de mampostería, deflexiones verticales excesivas en las placas de entrepiso y fallas estructurales en al menos dos columnas principales de las edificaciones.

Tabla 1 *Casos de colapso por fallas estructurales – Elaboración propia*

Casos de Colapso	Ubicación	Fecha del Colapso	Causas Principales del Colapso	Referencias
Edificio Zumrut	Konya, Turquía	2 de febrero de 2004	Errores de diseño y construcción. Diferencias entre las cargas reales y las cargas de diseño, espesores de sistemas de piso menores a los admisibles, refuerzos inadecuados e insuficientes, y sobrecargas en el suelo.	(Yamin et al. 2019)
L'Ambiance Plaza	Bridgeport, Connecticut, Estados Unidos	23 de abril de 1987	Pérdida de soporte en el techo del nivel 12. Inestabilidad de las cuñas que soportaban las losas debido a un inapropiado dimensionamiento del tamaño de las crucetas a cortantes en las losas y la pobre restricción de movimiento de las crucetas a cortante.	U de Andes (2014)
Edificio Space	Medellín, Colombia	12 de octubre de 2013	Errores en el diseño estructural, colocación incorrecta del acero de refuerzo, dimensiones insuficientes de las columnas, problemas en la construcción de pilas de cimentación, y asentamientos diferenciales.	Benitez (2021)

En particular, el edificio SPACE registró asentamientos diferenciales que estaban por encima de los valores admisibles establecidos por la normativa vigente. Las causas más probables de los altos asentamientos se atribuyen a problemas presentados durante la construcción de las pilas de cimentación, con evidencia de que al menos una de las pilas no quedó construida con las especificaciones establecidas en el diseño en relación con el diámetro de la base.

Por último, las evaluaciones analíticas detalladas indican que, incluso sin los asentamientos diferenciales registrados, las configuraciones originales de ambos edificios presentaban un alto riesgo de colapso ante las cargas sísmicas de diseño o ante una eventual falla frágil por flujo plástico

acelerado de las columnas críticas sometidas a altas cargas axiales (U de Andes, 2014). El análisis demuestra que, de haberse diseñado y construido las columnas cumpliendo con los requisitos mínimos de las NSR-98 correspondientes a la capacidad axial de carga, estas hubieran tenido la capacidad de resistir las cargas axiales asociadas a dicha situación, aun considerando la ocurrencia de los asentamientos diferenciales registrados.

4 Resultados

4.1 Diagramas de momento - curvatura de la columna S3

Los diagramas de momento curvatura muestran la relación entre el momento flector aplicado a una columna y su curvatura resultante, la cual consiste en la medida de la deformación angular de la sección transversal. En el inicio del diagrama, se sigue una relación lineal en donde el aumento del momento flector resulta en un aumento proporcional de la curvatura siendo algo típico en el rango elástico del material, en la figura 9, se observa las secciones de la columna que se ingresaron en el software RESPONSE2000; la columna S3 que falló (caso 1) y la sección cumpliendo lo mínimo de la NSR-98 (caso 2):

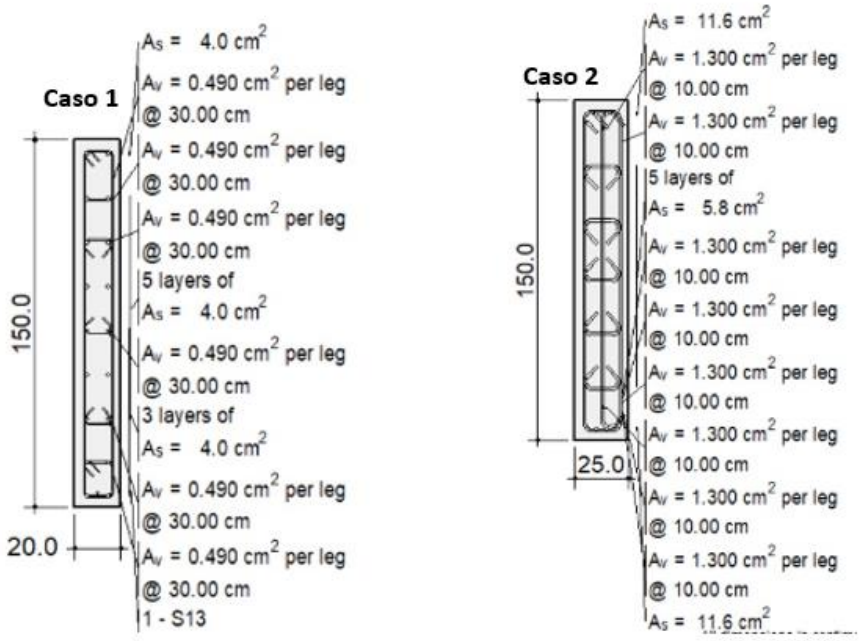


Figura 9 *Sección de la columna S3 y sección con NSR-98.*

Response2000 es un software libre de fácil uso que puede calcular la resistencia y ductilidad de una sección transversal sometida a carga axial, de momento y de cortante, las tres cargas se consideran simultáneamente para encontrar la respuesta de carga-deformación.

Response es capaz de calcular la resistencia de las vigas y pilares tradicionales tan bien o mejor que los métodos existentes y, lo que es más importante, es capaz de hacer predicciones de las resistencias a cortante para secciones que no se pueden modelar fácilmente hoy en día, como las columnas circulares y las vigas de alma cónicas. Con su rápida entrada y salida, interfaz basada en Windows y amplia salida gráfica, puede permitir una fácil verificación de los resultados.

En la figura 10, se observa la comparación de cómo el momento se va incrementando para ambas secciones analizadas, el diagrama puede mostrar una curvatura creciente que comienza a no ser proporcional al momento, esto refleja el punto de carga máxima antes del inicio del comportamiento plástico. En la siguiente fase, la curva se vuelve más plana o puede llegar a ser no lineal, esto nos indica que la sección ha comenzado a experimentar deformaciones plásticas y el momento flector sigue aumentando mientras que la curvatura también aumenta, pero no tan rápidamente.

Para calcular la ductilidad por curvatura y las rotaciones asociadas a la fluencia y al momento último en elementos estructurales, se utilizan las siguientes ecuaciones y conceptos (Aguiar et al, 2015):

La ductilidad por curvatura ($\mu\phi$) se define como la relación entre la curvatura última (ϕu) y la curvatura de fluencia (ϕy)

$$\mu\phi=\phi u / \phi y$$

La curvatura de fluencia se obtiene en el punto donde el acero de refuerzo comienza a fluir (es decir, cuando alcanza su límite elástico). Se puede calcular usando la deformación de fluencia del acero (ϵy) y la profundidad del eje neutro (c):

$$\phi y= \epsilon y / c$$

La curvatura última se determina en el punto de máxima capacidad de momento del elemento estructural. Depende de la deformación última del concreto (ϵcu) y la profundidad del eje neutro (c):

$$\phi u = \epsilon cu / c$$

La rotación asociada a la fluencia se puede calcular multiplicando la curvatura de fluencia por la longitud de la zona plástica (Lp):

$$\theta y = \phi y \, . \, Lp$$

Similarmente, la rotación asociada al momento último se obtiene multiplicando la curvatura última por la longitud de la zona plástica:

$$\theta u = \phi u \cdot Lp$$

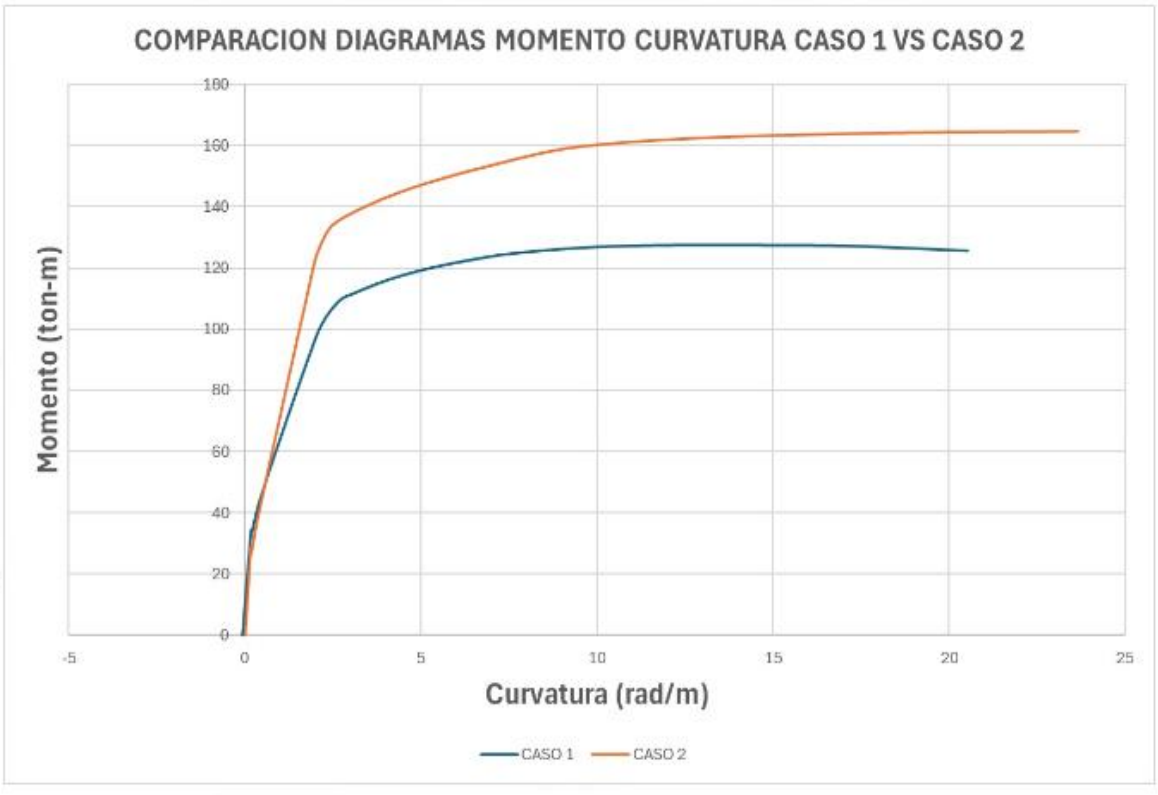


Figura 10 *Diagramas de momento - curvatura de la columna S3.*

Sección analizada caso real Space **Sección analizada Normal NSR-98**

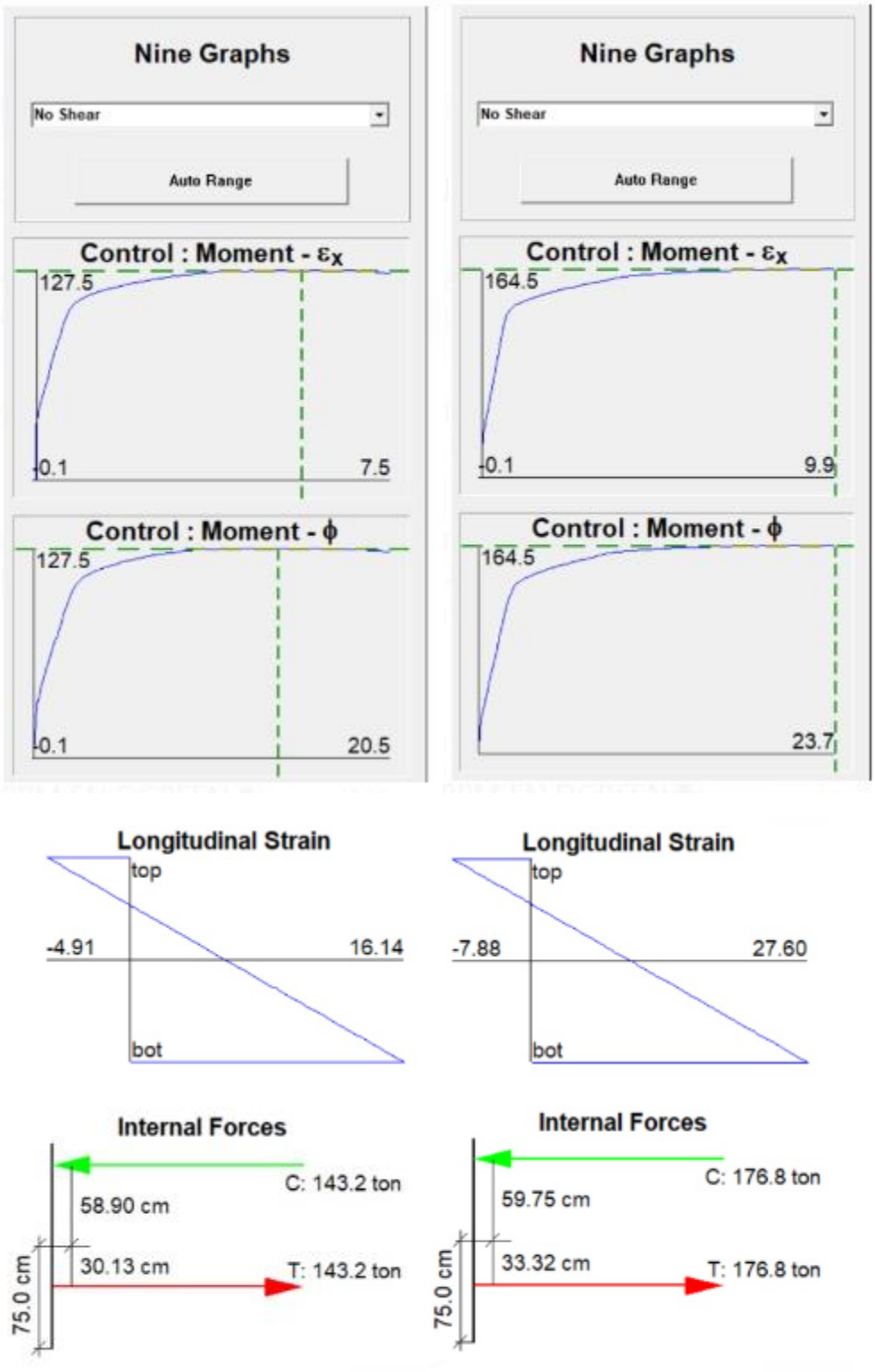


Figura 11 *Modelos resultantes del programa Response*

5 Análisis de resultados y conclusiones

El estudio de las causas del colapso del edificio Space permitió identificar varios factores técnicos clave que llevaron al desastre. En primer lugar, la columna S3, una de las más críticas en la estructura, no cumplía con los requisitos mínimos establecidos por la normativa vigente (NSR-98). Se encontraron deficiencias significativas en el armado de los estribos y en la disposición del acero longitudinal, lo que comprometió su capacidad para soportar las cargas de compresión y resistir los esfuerzos cortantes. Este hecho está directamente vinculado con el objetivo de evaluar las fallas en los elementos estructurales del edificio y entender los mecanismos que provocaron su colapso.

Por otro lado, las cargas que actuaron sobre las columnas durante la vida útil del edificio superaron las capacidades de diseño. A esto se sumaron los asentamientos diferenciales en las cimentaciones, que no fueron adecuadamente previstos ni mitigados durante la etapa de diseño y construcción. Estos factores agravaron las condiciones de sobrecarga en las columnas, generando una falla progresiva. Este aspecto responde al objetivo de estudiar edificaciones que colapsaron debido a su propio peso y sin la influencia de esfuerzos externos.

El examen de los diagramas de momento-curvatura para la columna S3 mostró que su capacidad de deformación y disipación de energía fue limitada, principalmente por la falta de cumplimiento normativo en el refuerzo. Al comparar la sección original con una propuesta ajustada a las normativas actuales, se evidenció que una ejecución conforme a los estándares habría resultado en un comportamiento más seguro y eficiente.

Además, al comparar este caso con otros colapsos internacionales, como el edificio Zumrut en Turquía y L’Ambiance Plaza en Estados Unidos, se identificaron patrones similares en los errores de diseño y construcción, sobre todo en cuanto al acero de refuerzo y las cimentaciones. Estas coincidencias permiten extraer conclusiones valiosas sobre las fallas estructurales que deben ser corregidas para evitar incidentes similares en el futuro.

En resumen, el colapso del edificio Space demuestra la necesidad de garantizar que tanto los diseños estructurales como los procesos constructivos cumplan rigurosamente con las normativas

y estándares establecidos. Los errores identificados resaltan la importancia de realizar una supervisión adecuada durante la ejecución de las obras, y de prever con mayor precisión los riesgos asociados a las cargas y asentamientos. Las lecciones derivadas de este caso representan un llamado de atención para los profesionales del sector, subrayando la urgencia de mejorar las prácticas constructivas para evitar colapsos catastróficos en el futuro.

6 Recomendaciones

Es crucial que en cualquier proyecto de construcción se preste especial atención al diseño estructural desde sus primeras etapas. Cada elemento, especialmente aquellos críticos como las columnas, debe cumplir con los requisitos establecidos en las normativas, como el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Asegurarse de que el refuerzo, las dimensiones y los materiales utilizados respeten las especificaciones es vital para garantizar la estabilidad de la estructura.

Durante la construcción, es indispensable realizar una supervisión continua y detallada del trabajo en sitio. Los errores más comunes, como la incorrecta colocación del acero de refuerzo o la mala disposición de los estribos, pueden parecer menores en el momento, pero sus consecuencias a largo plazo pueden ser graves. La calidad en la ejecución debe ser una prioridad, evitando a toda costa decisiones apresuradas que busquen reducir costos o tiempos a expensas de la seguridad estructural.

Además, es importante mantenerse actualizado en las normativas vigentes y en las mejores prácticas constructivas. El uso de tecnologías, como los modelos numéricos y las simulaciones de comportamiento estructural, puede ayudar a prever posibles fallas y a tomar decisiones más informadas. También es recomendable fortalecer los conocimientos sobre control de calidad en materiales, ya que un concreto mal preparado o un acero inadecuado comprometen la integridad de toda la estructura.

Por último, no se debe subestimar el impacto que los asentamientos diferenciales y otros problemas en la cimentación pueden tener en el comportamiento general de la edificación. Prever estos factores desde el diseño y controlar su evolución durante la construcción puede marcar la diferencia entre una estructura segura y una propensa a fallos. El conocimiento y la rigurosidad en todas las etapas del proyecto son esenciales para garantizar construcciones seguras y duraderas.

Referencias

Aguiar, R. Mora, D. Rodriguez, M (2015). Diagrama momento-curvatura para elementos de hormigon armado.

AIS -Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010). Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10, Bogotá, Colombia.

American Concrete Institute (ACI). (2011). Guide to Concrete Construction. ACI Committee 301

Benitez, D. (2021). Analisis de sobre esfuerzos en colapso de edificaciones de concreto reforzado. Universidad de Antioquia.

Calderón, M. (2021). Evaluación de errores más comunes en el proceso constructivo en cimentación y muros en las viviendas de albañilería confinada de los sectores 14, 19 y 21 Cajamarca 2019. Universidad Privada del Norte. Cajamarca, Perú.

Gómez, (2019). Diseño y fabricación de un modelo reducido de la construcción de la etapa 6 del edificio Space de Medellín para pruebas en centrifuga. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Universidad de los Andes. (2014). Concepto técnico con relación a las causas más probables del colapso del edificio Space. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Yamin, L. Correal, J. Reyes, J. Ramírez F. Álvaro, R. Hurtado y Dorado (2018). Sudden collapse of the 27-Story Space building in Medellin, Colombia. American Society of Civil Engineers.