

Review

Use of Steel and Concrete in Columns for Earthquake-Resistant Buildings: A Systemic Review

Christel Gonzalez ¹, Diana Rivera ^{1*}, Lisseth Barba ¹ and Walter Cruz ¹

¹ Faculty of Engineering Science, State Technical University of Quevedo, Quevedo 120301, Ecuador
 * Correspondence: driverac5@uteq.edu.ec

Abstract: The article presents a study on optimizing the structural design of earthquake-resistant buildings, focusing particularly on the utilization of steel and concrete columns. Through an extensive investigation and analysis of relevant documents, the article aims to deepen our understanding of how these materials contribute to the effectiveness of anti-seismic structures, crucial for mitigating seismic risks in vulnerable regions and minimizing potential human and material losses during strong earthquakes. Civil engineers widely favor steel and concrete due to their superior resilience against seismic forces, emphasizing the importance of strategic material management to bolster a building's earthquake resistance. The article underscores the critical role of steel and concrete columns in upholding the overall structural integrity of earthquake-resistant constructions. Furthermore, it delves into the proper handling and compacting techniques for these materials, highlighting their efficacy in enhancing resistance. Through this comprehensive examination, the article provides valuable insights into why steel and concrete are indispensable components in the construction of earthquake-resistant buildings, offering a pertinent overview of the study's purpose, methods, main findings, and conclusions..

Keywords: Earthquake-resistant; anti-seismic; buildings; structural; steel; concrete.

1. Introducción

El estudio de las edificaciones sismorresistentes ha sido un tema de gran interés en la arquitectura debido a los efectos destructivos de los terremotos en las estructuras convencionales [1,2]. En la actualidad, se ha enfocado en realizar análisis estructurales detallados para mitigar estos efectos y mejorar la capacidad de resistencia ante eventos sísmicos. Entre las técnicas empleadas, destacan el uso de elementos compuestos de acero y hormigón armado, los cuales son esenciales para garantizar la estabilidad y seguridad de las edificaciones ante tales eventos [2].

No obstante, a pesar de los avances en la arquitectura sismorresistente, aún persisten desafíos importantes relacionados con la evaluación de la rentabilidad y la capacidad de resistencia sísmica de estas estructuras, especialmente en áreas con alta actividad sísmica. Por ello, esta investigación aborda la importancia de seleccionar los materiales y estructuras adecuadas para prevenir futuros desastres causados por eventos sísmicos. Se propone la aplicación rigurosa de elementos de pared compuestos de acero y hormigón, resaltando su capacidad para resistir las fuerzas sísmicas y asegurar la estabilidad de las edificaciones [3]. La solución propuesta se dirige a revisar y seleccionar los mejores materiales para las construcciones sismorresistentes, con un énfasis particular en la importancia de las columnas en los edificios altos, las cuales deben mantener su capacidad de carga axial durante un terremoto. Los sistemas estructurales compuestos de acero y hormigón ofrecen ventajas significativas en este aspecto, como el uso de vigas de acero con tubos llenos de concreto y columnas de concreto reforzado con acero [4].

El terremoto ocurrido en Ecuador en 2016 es un claro ejemplo de las devastadoras consecuencias que pueden tener las edificaciones que no cuentan con bases sismorresistentes

Citation: Gonzales, C.; Rivera, D.; Barba, L.; Cruz, W. Use of Steel and Concrete in Columns for Earthquake-Resistant Buildings: A Systemic Review. *Journal Not Specified* 2024, 1, 0. <https://doi.org/>

Received:

Revised:

Accepted:

Published:

Copyright: © 2024 by the authors. Submitted to *Journal Not Specified* for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

adecuadas [5]. Esto pone en evidencia la necesidad de mejorar las prácticas de diseño y construcción en este ámbito, como se ilustra en la Figura 1.



Figure 1. La figura 1 muestra una serie de imágenes que reflejan las causas del terremoto ocurrido en Ecuador. En la figura 1(a) se pueden ver edificaciones afectadas en Guayaquil. En la figura 1(b), se evidencian los daños en un puente en la misma ciudad. En la figura 1(c), se muestra un hotel que se desplomó en Manta. Por último, en la figura 1(d), se muestra el estado de los edificios en Pedernales después del terremoto. Fuente: [El País](#)

1.1. Estado del arte

En este apartado se presentan trabajos con visiones similares al del presente estudio, los cuales buscan indagar acerca del uso de materiales sismorresistentes en edificaciones [6–9].

El estudio de Ascione *et al.* [6] presenta contribuciones significativas al explorar sistemas estructurales sostenibles y eficientes para edificios altos de madera y acero-madera. Pero no profundiza en el uso de hormigón y acero como refuerzo para aumentar la resistencia y estabilidad de los edificios altos.

Por otro lado, en el trabajo de Abeysiriwardena *et al.* [7], se destaca la vulnerabilidad de los edificios escolares de hormigón armado de baja ductilidad frente a eventos sísmicos, especialmente en estructuras de dos y tres pisos. Estos hallazgos resaltan la importancia de actualizar las prácticas de diseño para garantizar la resistencia lateral necesaria en edificaciones escolares ante posibles terremotos. Sin embargo, el artículo únicamente aborda el uso del hormigón en la construcción de las estructuras escolares, dejando de lado el acero o una combinación de ambos.

En el trabajo de Bruneau [8] enfatizan la importancia de utilizar materiales adecuados y seguir prácticas de construcción precisas para garantizar la resistencia ante terremotos. Se resalta la necesidad de prestar atención a los detalles de fundición y la calidad de ejecución para evitar debilidades estructurales. No obstante, su investigación carece de un enfoque detallado en la aplicación específica de acero y concreto en columnas antisísmicas.

La investigación realizada por Wood [9] subraya la relevancia de emplear materiales y técnicas de construcción apropiadas en la creación de edificaciones sismorresistentes. La atención meticulosa a los detalles y la calidad en la ejecución son esenciales para garantizar la seguridad y la durabilidad de las estructuras en condiciones adversas. Sin embargo, no profundiza en las técnicas de compactación y manejo de materiales clave para mejorar la resiliencia ante eventos sísmicos.

Se observa una carencia significativa en la literatura existente en cuanto a la aplicación específica de materiales como el acero y el concreto en la construcción de columnas para

edificaciones sismorresistentes. Además, se evidencia la falta de estudios detallados sobre las técnicas de compactación y manejo de estos materiales, lo cual limita la comprensión completa de cómo mejorar la resiliencia ante eventos sísmicos. Por lo tanto, nuestra investigación surge como una respuesta a estas carencias, enfocándose en el análisis exhaustivo de la implementación de acero y concreto en columnas para edificaciones antisísmicas. Además, se explorará estrategias innovadoras para mejorar su resistencia y durabilidad en condiciones adversas.

En base a ello, se plantearon las preguntas y los objetivos de la investigación.

1.2. Preguntas de Investigación

1. ¿Cómo afecta la combinación de acero y otros materiales en las construcciones sismorresistentes?
2. ¿Existen casos en los que se prefiere usar columnas mixtas en lugar de columnas de acero para edificaciones sismorresistentes?
3. ¿Cómo influye la ubicación geográfica en el diseño de una construcción sismorresistente?

Las preguntas de investigación resaltan la importancia de investigar cómo la utilización del acero y el hormigón en columnas para edificios sismorresistentes puede influir en la resistencia estructural y en la seguridad durante eventos sísmicos, así como en la mejora de las prácticas de diseño y construcción en ingeniería estructural. Es fundamental comprender cómo estos materiales pueden afectar la capacidad de carga, la deformación estructural y la absorción de energía en situaciones de terremotos para garantizar la eficacia y durabilidad de las estructuras antisísmicas [10].

1.3. Objetivos

- Evaluar la eficacia de las construcciones sismorresistentes en zonas de alta actividad sísmica.
- Identificar y seleccionar los materiales más adecuados para construcciones sismorresistentes.
- Investigar la efectividad del acero y el hormigón en construcciones sismorresistentes.

El documento sigue una estructura metodológica, abordando la importancia del uso de acero y hormigón en columnas para edificios sismo-resistentes en la Introducción, seguido de la descripción de la metodología de investigación en la sección de Materiales y Métodos, los hallazgos sobre la resistencia sísmica en los Resultados, el análisis comparativo con la literatura existente en la sección de Discusión, y las implicaciones prácticas y futuras investigaciones en las Conclusiones.

2. Materiales y Métodos

En esta sección se detalla a profundidad los materiales y la metodología empleada del estudio, que tiene como fin recopilar los hallazgos más relevantes acerca del uso de materiales en edificaciones sismorresistentes.

Antes de iniciar la investigación, se llevó a cabo una planificación de los pasos a seguir, siguiendo un protocolo de revisión estructurado. Los pasos planificados fueron los siguientes:

1. Adecuación del protocolo;
2. Recopilación de materiales;
3. Diseño de búsqueda;
4. Selección de criterios de inclusión y exclusión;
5. Diseño de Evaluación de calidad;
6. Extracción de datos.

2.1. Materiales

Para llevar a cabo la investigación, se utilizaron los siguientes materiales:

- Bases de datos como Springer, Elsevier, y MDPI. 118
- Mendeley como herramienta para organizar y gestionar las referencias bibliográficas. 119
- Excel para organizar y estructurar la información recopilada. 120

2.2. Metodología 121

Protocolo de Revisión 122

La metodología de la investigación se desarrolló siguiendo un protocolo de revisión detallado, siguiendo los lineamientos de Kitchenham [11] de manera cronológica:

1. Búsqueda de Estudios: En primer lugar se realizó una búsqueda exhaustiva en las bases de datos mencionadas, utilizando la cadena de búsqueda: "Earthquake-resistant buildings" AND "steel columns" OR "concrete" AND "earthquake-resistant structures" AND "construction materials". El objetivo de esta búsqueda fue recopilar estudios científicos y técnicos que aborden la resistencia sísmica en edificaciones.

2. Selección de Estudios: Tras la búsqueda inicial, las bases de datos arrojaron diversos artículos, de los cuales se aplicaron criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los estudios pertinentes. Los criterios de inclusión consideraron la relevancia del contenido en relación con la resistencia sísmica, la claridad y transparencia en la presentación de la metodología utilizada, la disponibilidad de DOI para acceder al estudio completo. Los criterios de exclusión abordaron aspectos como la falta de relevancia temática, la duplicación de estudios y la baja calidad metodológica.

3. Evaluación de Calidad: Después de la selección de estudios, se procedió a realizar una evaluación meticulosa de la calidad de los estudios seleccionados, considerando varios aspectos clave para garantizar la validez y confiabilidad de los resultados obtenidos:

- Se evaluó la solidez de cada estudio, incluyendo aspectos como la claridad en la formulación de objetivos de investigación, la definición precisa de variables, la selección adecuada de métodos y herramientas de investigación, y la mitigación de posibles sesgos y limitaciones. 140
141
142
143
- Se examinó la idoneidad de los métodos utilizados para recopilar y analizar los datos, considerando si estos métodos eran apropiados para responder a las preguntas de investigación planteadas. 144
145
146
- Se evaluó la claridad y transparencia en la presentación de los hallazgos y resultados obtenidos en cada estudio, verificando si se proporcionaron detalles suficientes sobre los procedimientos utilizados. 147
148
149
- Por último, se analizó la consistencia interna de los resultados dentro de cada estudio, buscando coherencia y congruencia entre los hallazgos presentados, así como la ausencia de inconsistencias significativas que pudieran afectar la interpretación de los resultados. 150
151
152
153

4. Extracción de Datos: Se procedió a la extracción sistemática de datos relevantes de los estudios seleccionados, enfocándose en variables clave relacionadas con el uso de materiales como el acero y el hormigón en la construcción de columnas, la ubicación geográfica de las edificaciones analizadas y las técnicas sismorresistentes empleadas. Esta etapa se llevó a cabo utilizando una hoja de extracción de datos diseñada específicamente para este propósito.

5. Análisis de Datos: Finalmente, los datos extraídos fueron sometidos a un análisis exhaustivo que incluyó la identificación de patrones, tendencias y relaciones entre las variables analizadas. Se utilizaron técnicas de análisis descriptivo e inferencial según la naturaleza de los datos recopilados, con el objetivo de responder a las preguntas de investigación planteadas en la introducción y proporcionar conclusiones significativas y respaldadas por evidencia científica.

3. Resultados y Discusión 166

En esta sección, se presenta la tabla de extracción de datos que busca responder las preguntas de investigación, observar tabla 1. Además, se presenta una síntesis de los datos extraídos acerca del uso de acero y hormigón en construcciones sismorresistentes.

Table 1. Tabla de extracción de datos

Ref	Tipo Doc	Año	Efectos de combinación de materiales	Preferencia de material	Ubicación geográfica	Revisor
[12]	Journal	2015	La combinación de los materiales como son el acero y las mezclas mixtas, requieren de investigación para así, brindarles la confianza necesaria a los ingenieros para usar un nuevo material de manera segura y eficiente.	Se prefiere usar el acero que es un acero estructural que tendrá una resistencia alta.	X	Rivera Diana
[2]	Journal	2020	Las acciones sísmicas se tienen en cuenta a través de restricciones de deflexión lateral evaluadas mediante análisis de empuje estático no lineal. Además, se determinan y evalúan los períodos fundamentales de los edificios óptimamente diseñados.	En el documento, se establece que el acero es el material preferido para construcciones sísmicas.	X	Rivera Diana
[13]	Journal	2006	X	Hormigón armado (CR) diseñadas según el Eurocódigo 8	X	Rivera Diana
[3]	Journal	2021	X	Una tecnología basada en el uso de tirantes de acero resistentes y rígidos puede reducir la capacidad disipativa de la estructura, en comparación con el uso de placas clavadas o las conexiones disipativas.	La ubicación también llegará a ser clave fundamental, ya que eso nos ayudará a saber cómo será el funcionamiento de los materiales.	Rivera Diana

Continua en la siguiente pagina

Table 1 – Tabla de extracción de datos

Ref	Tipo	Año	Efectos de combinación de materiales	Preferencia de material	Ubicación geográfica	Revisor
[14]	Journal	2001	X	El hormigón es el material que encabeza y es el material de preferencia de la información extraída.	Se mostró un interés activo por los terremotos en inglés, del sur de Europa, japoneses y americanos.	Rivera Diana
[15]	Journal	2022	Las estructuras de acero sísmicas resistentes, que pueden restaurarse y reutilizarse rápidamente después de un fuerte terremoto.	Uno de los sistemas más populares es el marco arriostrado de acero con balanceo controlado (CRS BF).	Los terremotos de Northridge de 1994 y Kobe de 1995 desafiaron la percepción arraigada de que las estructuras de acero tienen un comportamiento sísmico inherentemente excelente.	Rivera Diana
[10]	Journal	2009	Combinados con capacidades gráficas activas/pasivas para facilitar un diseño seguro, confiable y óptimo.	El diseño sismorresistente de edificios de hormigón armado.	X	Rivera Diana
[16]	Journal	2014	X	X	Se analiza el enfoque de los códigos de diseño de edificios en Estados Unidos.	Rivera Diana
[17]	Journal	2020	La sección de concreto y el refuerzo de acero deben dimensionarse de modo que el momento flector de diseño de la regla "columna fuerte - viga débil" junto con la fuerza axial de diseño del análisis para la situación de diseño.	Hormigón armado (RC).	X	Rivera Diana

Continua en la siguiente pagina

Table 1 – Tabla de extracción de datos

Ref	Tipo	Año	Efectos de combinación de materiales	Preferencia de material	Ubicación geográfica	Revisor
[18]	Journal	2023	La combinación de acero y hormigón en las columnas, ayuda en una excelente ductilidad.	En este caso, el material de preferencia son las columnas de tubos de acero llenas de hormigón.	Estos tienen grandes influencias en industrias, edificios de gran altura, puentes y otras estructuras.	Barba Lisseth
[19]	Journal	2023	El comportamiento axial de una columna de tubo de acero relleno de hormigón utilizando fibra de acero.	Se determinó que el estudio de preferencia fue de una columna de tubos de acero de doble capa sometida a carga axial.	Es popular en el sector de la construcción.	Barba Lisseth
[20]	Journal	2024	Los estribos mejoraron significativamente las propiedades mecánicas de las columnas con grandes relaciones huecas, rigidez, la capacidad de carga y la ductilidad, a medida que aumenta la relación de estribo.	Los estribos mejoraron de manera más efectiva el rendimiento general de las columnas.	X	Barba Lisseth
[21]	Journal	2024	Se realizó una combinación de tubos de acero llenos de hormigón con columnas, las cuales no quedaron expuestas en el interior.	La viga está compuesta de acero.	X	Barba Lisseth
[22]	Journal	2024	Hormigón armado y tubos de acero.	Columnas de acero.	Su aplicación específica es en industrias de construcción.	Barba Lisseth
[4]	Journal	2024	Elementos estructurales compuestos por dos tubos lleno de hormigón.	Tubos de acero.	X	Barba Lisseth

Continua en la siguiente pagina

Table 1 – Tabla de extracción de datos

Ref	Tipo	Año	Efectos de combinación de materiales	Preferencia de material	Ubicación geográfica	Revisor
[23]	Journal	2023	El hormigón confinado con polímero reforzado con fibra se utiliza para mejorar la durabilidad del hormigón.	Hormigón confinado.	X	Barba Lisseth
[24]	Journal	2023	En este caso, la combinación se da entre el hormigón y el acero.	Hormigón armado y acero.	X	Barba Lisseth
[25]	Journal	2023	Se dio a cabo un estudio de los efectos y resistencia del hormigón, el límite elástico del tubo de hacer, el espesor y su altura.	Las columnas tubulares de acero llenas de hormigón.	X	Barba Lisseth
[26]	Journal	2021	El sistema de tubos enmarcados consta de columnas perimetrales estrechamente espaciadas unidas por vigas enjutas profundas en los niveles del piso, de modo que el edificio opera como un enorme voladizo vertical para resistir cargas laterales de manera efectiva.	Se prefiere el acero ya que la estructura está sujeta a funciones de excitación intensificadoras pre-diseñadas en lugar de un conjunto de movimientos.	X	González Christel
[27]	Journal	2010	En el método refinado de análisis de bisagras plásticas, se incluyen la no linealidad geométrica de una estructura de marco de acero, la plastificación gradual de las secciones de los miembros y la imperfección geométrica de los miembros de las columnas.	Rapidez del trabajo y también se obtiene menos distorsión cuando se trata de la sismorresistencia.	X	González Christel

Continua en la siguiente pagina

Table 1 – Tabla de extracción de datos

Ref	Tipo	Año	Efectos de combinación de materiales	Preferencia de material	Ubicación geográfica	Revisor
[28]	Journal	2020	Se incorpora dimensiones longitudinales claras entre vigas y columnas, zonas de paneles y un tramo de gravedad equivalente sin acción compuesta de la losa parece ser un modelo práctico con la precisión adecuada.	Con el acero se obtiene una mejor resistencia para las edificaciones.	X	González Christel
[29]	Journal	2022	Cuando se analizan las columnas en el segundo tramo, se identificaron las variables que presentaron la mayor disminución en días de manera individual.	Se utiliza el acero debido a la rapidez que se obtiene en el proceso. Después del vaciado, se establece un tiempo de espera de 1 día para ejecutar el desencofrado y aumentar nuevamente la cantidad de formaleta disponible.	X	González Christel
[30]	Journal	2021	Se realizó utilizando acero puro en cada estructura, diseñada para ser rígida al 100%, al 80%, al 70% y al 60% de rigidez en las conexiones viga-columna.	Se requiere completamente el acero puro por su eficiencia hacia la sismorresistencia.	X	González Christel
[31]	Journal	2023	Los materiales se colocan y aseguran en su posición definitiva, se instalan y nivelan las placas o pernos, y finalmente se procede al vaciado del hormigón según la calidad.	El uso del acero se justifica por las mejoras en productividad, sostenibilidad y tecnología que ofrece. Además, se aborda el impacto positivo del aumento de la velocidad de la obra gruesa en un proyecto de edificación.	X	González Christel

Continua en la siguiente pagina

Table 1 – Tabla de extracción de datos

Ref	Tipo	Año	Efectos de combinación de materiales	Preferencia de material	Ubicación geográfica	Revisor
[32]	Journal	2002	Las vigas-columnas de hormigón armado con acero tienen el potencial de proporcionar una resistencia y ductilidad excelentes en comparación con las vigas de hormigón armado.	La construcción compuesta de acero y hormigón ofrece importantes ventajas para su uso como sistema primario de resistencia lateral en estructuras de construcción sometidas a cargas sísmicas.	La investigación en los Estados Unidos sobre ingeniería sísmica de edificios que utilizan sistemas estructurales compuestos de acero y concreto.	González Christel
[1]	Journal	2012	La combinación de materiales en estas estructuras afecta la distribución de fuerzas laterales y la rigidez de los pisos, influyendo en el comportamiento dinámico del sistema.	El estudio se basa en estructuras de respuesta uniforme, donde miembros comparten ratios de demanda-capacidad independientemente de su ubicación.	X	González Christel
[33]	Journal	2023	Para cada tipo de elemento estructural, los detalles de la técnica de construcción de ejemplo de diferentes tipos de edificios se presentan mediante diferentes vistas como en 3D, alzado o planta de techo para definir las técnicas de construcción	Las técnicas constructivas y los materiales utilizados en los diferentes componentes del edificio: muro, columna, cabecera de columna, pilar, arco, elemento de transición y superestructura.	Bergama, Esmirna, Turquía.	González Christel
[34]	Journal	2007	Mejora el rendimiento estructural al brindarle al concreto soporte adicional y resistencia al corte.	Consta de un tubo interior de aluminio y un tubo exterior de fibra de vidrio, con un espacio hueco entre ellos.	X	Cruz Walter

Continua en la siguiente pagina

Table 1 – Tabla de extracción de datos

Ref	Tipo	Año	Efectos de combinación de materiales	Preferencia de material	Ubicación geográfica	Revisor
[26]	Journal	2021	X	Edificios de gran altura centralizados en los tubos con estructura de acero.	Áreas metropolitanas.	Cruz Walter
[35]	Journal	2019	X	Se propone un sistema modular fabricado en acero y hormigón ligero.	Zonas Urbanas.	Cruz Walter
[36]	Journal	2000	Al utilizar una columna compuesta incluyen una sección transversal más pequeña y una mayor relación resistencia-peso que un miembro de hormigón armado convencional.	Columnas compuestas íntegramente de hormigón.	X	Cruz Walter
[37]	Journal	2001	X	Columnas de hormigón y acero.	X	Cruz Walter
[38]	Journal	2012	Los compuestos de FRP tienen varias ventajas sobre el aluminio, las más notables son su resistencia superior a la corrosión y su alta resistencia al peso.	Estructuras de acero reforzado con FRP.	X	Cruz Walter
[39]	Journal	2021	Conexiones de fricción pueden ser empleados para evitar daños o colapsos en las estructuras, a través de la fricción o la histéresis inelástica de las deformaciones de torsión, corte y flexión.	X	X	Cruz Walter

Continua en la siguiente pagina

Table 1 – Tabla de extracción de datos

Ref	Tipo	Año	Efectos de combinación de materiales	Preferencia de material	Ubicación geográfica	Revisor
[40]	Journal	2017	Una alta rigidez inicial que resulta beneficiosa para reducir los daños constructivos en condiciones ambientales adversas, se utilizan ramos de hormigón armado (SRCW).	Estructuras híbridas de hierro y hormigón, obtenidas combinando elementos estructurales de hormigón armado (CR), hierro y compuestos acero-hormigón.	X	Cruz Walter
[41]	Journal	2013	Fáciles de reemplazar y mostraron buenos indicadores de desempeño en términos de ductilidad, rigidez, dissipación de energía y resistencia.	X	X	Cruz Walter

Los resultados obtenidos de la extracción de datos revelan aspectos significativos en relación con la resistencia sísmica de las columnas de acero y mixtas, así como destacan áreas de oportunidad y desafíos para futuras investigaciones en el campo de los edificios sismorresistentes.

En primer lugar, se identificó que las columnas de acero, en particular las columnas mixtas que combinan diferentes materiales, presentan una ventaja notable en términos de resistencia ante eventos sísmicos [30,37]. Esta combinación de materiales proporciona una mayor capacidad de absorción de energía y resistencia estructural, lo que las hace preferidas en edificaciones ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico [29,31].

Un aspecto relevante resaltado en los resultados es la necesidad de considerar el comportamiento a largo plazo de estas estructuras, especialmente en lo que respecta a la fatiga, la corrosión y el envejecimiento de materiales [25]. Estos fenómenos pueden afectar significativamente la integridad estructural con el tiempo, lo que subraya la importancia de realizar evaluaciones exhaustivas y estudios detallados sobre la durabilidad de las columnas y sus conexiones. La combinación de acero con otros materiales no solo puede tener efectos negativos, sino que, cuando se realiza de manera adecuada, proporciona una mayor efectividad a las columnas, generando beneficios significativos como resistencia y ductilidad. Estas características ayudan a minimizar los daños y a maximizar la seguridad estructural [2,14,19].

Es crucial considerar la ubicación geográfica al construir edificaciones sismorresistentes, ya que esto tiene un impacto significativo en el comportamiento sísmico de las estructuras [3]. Por lo tanto, es fundamental evaluar cuidadosamente las zonas geográficas para tomar decisiones informadas sobre los materiales, técnicas constructivas y otros aspectos, con el objetivo de mitigar los efectos de los sismos [12,15].

En ciertas circunstancias, las columnas mixtas se convierten en una opción preferida [18,19]. Estas columnas, que combinan acero y concreto, ofrecen una mayor resistencia y se utilizan principalmente en estructuras de gran altura y en regiones con alto riesgo sísmico [26]. Su uso optimiza la seguridad estructural y contribuye significativamente a proteger las edificaciones ante eventos sísmicos [30]. Además, se plantea la importancia de desarrollar nuevas técnicas de diseño y optimización que mejoren la ductilidad y la capacidad de disipación de energía de las columnas. Esto implica explorar métodos innovadores, así como implementar estrategias de control de vibraciones para minimizar los efectos negativos de los sismos en las estructuras y su entorno [34].

En términos de avances tecnológicos, se destaca el papel crucial de los nuevos materiales, como el acero de alta resistencia y ductilidad, así como el hormigón reforzado con fibras, que ofrecen alternativas prometedoras para aumentar la resistencia y durabilidad de las estructuras sismorresistentes [12]. Asimismo, la aplicación de tecnologías emergentes como la impresión 3D en la construcción de componentes estructurales abre nuevas posibilidades para mejorar la eficiencia y la precisión en la ejecución de proyectos [33]. La simulación y el análisis computacional juegan un papel fundamental en la investigación de edificios sismorresistentes, ya que permiten desarrollar modelos precisos y realizar simulaciones a gran escala para evaluar el comportamiento sísmico de las estructuras en contextos urbanos complejos [25,33,42].

Por último, se enfatiza la importancia de la sostenibilidad y la resiliencia en el diseño y desarrollo de edificios sismorresistentes. Es esencial considerar no solo el rendimiento ante sismos, sino también el impacto ambiental y la capacidad de recuperación de las estructuras y las comunidades después de un evento sísmico [10]. Los hallazgos derivados de esta investigación destacan la necesidad de seguir avanzando en el diseño, la optimización y la tecnología de construcción de edificaciones sismorresistentes, con un enfoque integral que abarque aspectos estructurales, tecnológicos, ambientales y sociales para garantizar la seguridad y la eficiencia en entornos sísmicos.

4. Conclusiones

En conclusión, a partir de los resultados y discusiones analizadas, se destaca la eficacia y la importancia de las edificaciones sismorresistentes, especialmente aquellas que emplean columnas de acero o mixtas, en la mitigación de riesgos durante eventos sísmicos. Estas estructuras han demostrado una alta resistencia a las fuerzas sísmicas, gracias a la combinación de resistencia y ductilidad que ofrecen las columnas de acero, permitiendo una deformación controlada que evita colapsos repentinos y reduce los riesgos para la vida humana y los materiales. Además, la construcción con columnas de acero se destaca por su rapidez y ligereza, lo que resulta crucial en áreas propensas a terremotos.

No obstante, es fundamental reconocer que la investigación y el desarrollo en este campo deben continuar para seguir mejorando la seguridad y la eficiencia de las estructuras sismorresistentes. Algunas de las futuras líneas de investigación que se proponen incluyen; La mejora de materiales y tecnologías, estudios de resiliencia y mitigación de riesgos, como también el análisis del comportamiento sísmico.

Estas líneas de investigación promueven el avance continuo en el diseño, la construcción y la evaluación de edificaciones sismorresistentes, contribuyendo así a la creación de entornos construidos más seguros y resilientes en áreas propensas a eventos sísmicos.

Referencias

1. Grigorian, M.; Grigorian, C.E. An Introduction to the Methodology of Earthquake Resistant Structures of Uniform Response. *Buildings* 2012, Vol. 2, Pages 107-125 **2012**, 2, 107–125. <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS2020107>.
2. Papavasileiou, G.S.; Charmpis, D.C. Earthquake-resistant buildings with steel or composite columns: Comparative assessment using structural optimization. *Journal of Building Engineering* **2020**, 27, 100988. <https://doi.org/10.1016/J.JBODE.2019.100988>.
3. Pacchioli, S.; Pozza, L.; Trutalli, D.; Polastri, A. Earthquake-resistant CLT buildings stiffened with vertical steel ties. *Journal of Building Engineering* **2021**, 40, 102334. <https://doi.org/10.1016/J.JBODE.2021.102334>.
4. Zhang, B.; Lin, S.; Zhang, S.; Lu, X.; Yu, T. Seismic behaviour of FRP-concrete-steel double-tube columns with shear studs: Experimental study and numerical modelling. *Engineering Structures* **2024**, 302, 117339. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2023.117339>.
5. Moreno-González, R.; Bairán, J.M. Collapse of Reinforced Concrete Framed Buildings in the Earthquake of April 16th2016, Tabuga– Ecuador. *Informes de la Construcción* **2018**, 65. <https://doi.org/10.3989/IC.11.002>.
6. Ascione, F.; Esposito, F.; Iovane, G.; Faiella, D.; Faggiano, B.; Mele, E. Sustainable and Efficient Structural Systems for Tall Buildings: Exploring Timber and Steel-Timber Hybrids through a Case Study. *Buildings* **2024**, 14. <https://doi.org/10.3390/buildings14020524>.
7. Abeysiriwardena, T.M.; Wijesundara, K.K.; Nascimbene, R. Seismic Risk Assessment of Typical Reinforced Concrete Frame School Buildings in Sri Lanka. *Buildings* **2023**, 13. <https://doi.org/10.3390/buildings13102662>.
8. Bruneau, M. Building damage from the Marmara, Turkey earthquake of August 17, 1999. *Journal of Seismology* **2002**, 6, 357–377. <https://doi.org/10.1023/A:1020035425531/METRICS>.
9. Wood, S.L. Performance of Reinforced Concrete Buildings during the 1985 Chile Earthquake: Implications for the Design of Structural Walls. *Earthquake Spectra* **1991**, 7, 607–638. <https://doi.org/10.1193/1.1585645>.
10. Saatcioglu, M.; Ozbaakkaloglu, T.; Naumoski, N.; Lloyd, A. Response of earthquake-resistant reinforced-concrete buildings to blast loadingThis article is one of a selection of papers published in the Special Issue on Blast Engineering. <https://doi.org/10.1139/L09-089> **2009**, 36, 1378–1390. <https://doi.org/10.1139/L09-089>.
11. Kitchenham, B.; Brereton, O.P.; Budgen, D.; Turner, M.; Bailey, J.; Linkman, S. Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review. *Information and Software Technology* **2009**, 51, 7–15. <https://doi.org/10.1016/J.INFSOF.2008.09.009>.
12. Uy, B. High-strength steel-concrete composite columns for buildings. <https://doi.org/10.1680/stbu.2003.156.1.3> **2015**, 156, 3–14. <https://doi.org/10.1680/stbu.2003.156.1.3>.
13. Kotsovov, G.; Zeris, C.; Kotsovov, M. The effect of steel fibres on the earthquake-resistant design of reinforced concrete structures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* **2007**, 40, 175–188. <https://doi.org/10.1617/S11527-006-9129-5/METRICS>.
14. Smith, K.G. Innovation in earthquake resistant concrete structure design philosophies; a century of progress since Hennebique's patent. *Engineering Structures* **2001**, 23, 72–81. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(00\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(00)00023-7).
15. Fang, C.; Wang, W.; Qiu, C.; Hu, S.; MacRae, G.A.; Eatherton, M.R. Seismic resilient steel structures: A review of research, practice, challenges and opportunities. *Journal of Constructional Steel Research* **2022**, 191, 107172. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2022.107172>.
16. Julián, C.; Hugo, H.B.; Astrid, R.F. Analysis of the Earthquake-Resistant Design Approach for Buildings in Mexico. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* **2014**, 15, 151–162. [https://doi.org/10.1016/S1405-7743\(15\)30013-5](https://doi.org/10.1016/S1405-7743(15)30013-5).
17. Foraboschi, P. Optimal Design of Seismic Resistant RC Columns. *Materials* **2020**, Vol. 13, Page 1919 **2020**, 13, 1919. <https://doi.org/10.3390/MA13081919>.

18. Srihari, J.; Sharmila, S.; Kumar, S.P. Study on axial behaviour of concrete filled steel tubular columns. *Materials Today: Proceedings* **2023**. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.07.112>. 277
278
19. Velrajkumar, G.; Mohan, A.; Gopalakrishnan, R.; Haritha, S. Experimental and theoretical investigation of concrete filled and encased steel column under compression loading. *Materials Today: Proceedings* **2023**. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2023.08.130>. 279
280
281
20. Ding, F.; Lu, D.; Lai, Z.; Liu, X. Study on restraint coefficient of the stirrups-stiffened square concrete filled double-skin steel tube axial compression stub columns. *Structures* **2024**, *60*, 105847. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.105847>. 282
283
21. Gao, S.; Chen, R.; Yang, J.; Guo, L.; Deng, L. Seismic performance of T-shaped CFST column to U-shaped steel composite beam joints. *Thin-Walled Structures* **2024**, *195*, 111443. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2023.111443>. 284
285
22. qin Jiang, Z.; yao Niu, Z.; Zhang, A.L.; chun Liu, X. Design method of axial compression stability for cross-section corrugated plate steel special-shaped column. *Thin-Walled Structures* **2024**, *194*, 111243. <https://doi.org/10.1016/J.TWS.2023.111243>. 286
287
23. Isleem, H.F.; Zewudie, B.B.; Bahrami, A.; Kumar, R.; Xingchong, W.; Samui, P. Parametric investigation of rectangular CFRP-confined concrete columns reinforced by inner elliptical steel tubes using finite element and machine learning models. *Helijon* **2024**, *10*, e23666. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2023.E23666>. 288
289
290
24. Eghbali, N.B.; Andamnejad, P. Structural performance of rigid shear connectors in concrete encased steel composite columns. *Structures* **2023**, *54*, 348–368. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.05.040>. 291
292
25. Tao, Y.; Yan, B.; Gan, D.; Zhao, Y. Analysis and design of axially loaded ring-beam joints connecting steel tubed-RC column and RC beams. *Structures* **2023**, *57*, 105304. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2023.105304>. 293
294
26. Sarcheshmehpour, M.; Estekanchi, H.E. Life cycle cost optimization of earthquake-resistant steel framed tube tall buildings. *Structures* **2021**, *30*, 585–601. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2021.01.038>. 295
296
27. Kaveh, A.; Azar, B.F.; Hadidi, A.; Sorochi, F.R.; Talatahari, S. Performance-based seismic design of steel frames using ant colony optimization. *Journal of Constructional Steel Research* **2010**, *66*, 566–574. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2009.11.006>. 297
298
28. Szuta, A.F.; Szczepański, J. Striking elements – A lifebelt or a fad? Searching for an effective way of adapting abandoned churches. *Frontiers of Architectural Research* **2020**, *9*, 277–286. <https://doi.org/10.1016/J.FOAR.2019.12.007>. 300
301
302
29. Hwang, S.H.; Shokrabadi, M.; Mangalathu, S.; Jeon, J.S. Effect of interior gravity framing system and composite floor slab action on the lifetime seismic risk assessment of steel frame buildings subjected to mainshock–aftershock sequence. *Structures* **2022**, *45*, 2332–2342. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2022.10.018>. 303
304
305
30. Rigi, A.; JavidSharifi, B.; Hadianfar, M.A.; Yang, T.Y. Study of the seismic behavior of rigid and semi-rigid steel moment-resisting frames. *Journal of Constructional Steel Research* **2021**, *186*, 106910. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2021.106910>. 306
307
31. da Silva, J.G.; de Lima, L.R.; da, P.C.; de Andrade, S.A.; de Castro, R.A. Nonlinear dynamic analysis of steel portal frames with semi-rigid connections. *Engineering Structures* **2008**, *30*, 2566–2579. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2008.02.011>. 308
309
32. Hajjar, J.F. Composite steel and concrete structural systems for seismic engineering. *Journal of Constructional Steel Research* **2002**, *58*, 703–723. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00093-1](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00093-1). 310
311
312
33. Demir, H.A.; Hamamcioğlu-Turan, M.; Yüçetürk, K.; Aktaş, E. Structural performance of authentic architectural heritage designs: A masonry monument in Western Anatolia. *Frontiers of Architectural Research* **2023**, *12*, 1212–1233. <https://doi.org/10.1016/J.FOAR.2023.08.002>. 313
314
315
34. Teng, J.G.; Yu, T.; Wong, Y.L.; Dong, S.L. Hybrid FRP–concrete–steel tubular columns: Concept and behavior. *Construction and Building Materials* **2007**, *21*, 846–854. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2006.06.017>. 316
317
35. Liew, J.Y.; Chua, Y.S.; Dai, Z. Steel concrete composite systems for modular construction of high-rise buildings. *Structures* **2019**, *21*, 135–149. <https://doi.org/10.1016/J.ISTRUC.2019.02.010>. 318
319
320
36. Saw, H.S.; Liew, J.Y. Assessment of current methods for the design of composite columns in buildings. *Journal of Constructional Steel Research* **2000**, *53*, 121–147. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00062-0](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00062-0). 321
322
323
37. Shanmugam, N.E.; Lakshmi, B. State of the art report on steel–concrete composite columns. *Journal of Constructional Steel Research* **2001**, *57*, 1041–1080. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(01\)00021-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(01)00021-9). 324
325
326
38. Teng, J.G.; Yu, T.; Fernando, D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Constructional Steel Research* **2012**, *78*, 131–143. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2012.06.011>. 327
328
329
39. Zhou, Y.; Shao, H.; Cao, Y.; Lui, E.M. Application of buckling-restrained braces to earthquake-resistant design of buildings: A review. *Engineering Structures* **2021**, *246*, 112991. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112991>. 330
331
332
40. Dall'Asta, A.; Leoni, G.; Morelli, F.; Salvatore, W.; Zona, A. An innovative seismic-resistant steel frame with reinforced concrete infill walls. *Engineering Structures* **2017**, *141*, 144–158. <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2017.03.019>. 333
334
335
41. Calado, L.; Proença, J.M.; Espinha, M.; Castiglioni, C.A. Hysteretic behaviour of dissipative bolted fuses for earthquake resistant steel frames. *Journal of Constructional Steel Research* **2013**, *85*, 151–162. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2013.02.016>. 336
337
338
42. Grigorian, M.; Moghadam, A.S.; Mohammadi, H.; Kamizi, M. Methodology for developing earthquake-resilient structures. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* **2019**, *28*, e1571. <https://doi.org/10.1002/TAL.1571>. 339
340
341
43. Chanturia, Y.; Yanusz, A. The System of the Plan Compositional Principles of the Gothic Town Building in the Grand Duchy of Lithuania **2019**. pp. 497–504. <https://doi.org/10.2991/AHTI-19.2019.93>. 342
343
344
44. Vidal, R.M. The Evolution of the Knowledge of Geometry in Early Gothic Construction: The Development of the Sexpartite Vault in Europe. *International Journal of Architectural Heritage* **2017**, *11*, 1005–1025. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1332254>. 345
346
347

-
45. Regan, B. Gothic Pride: The Story of Building a Great Cathedral in Newark. *New Jersey Studies: An Interdisciplinary Journal* **2016**, 2, 231–233. <https://doi.org/10.14713/NJS.V2I1.34>. 335
336
46. Medina, J.M.; Rodríguez, A.; Medina, E.; Cassinello, M.J. Factors defining Gothic lighting. Relationship between volume, 337
structure and luminous result in Spanish cathedrals. *Revista de la Construcción. Journal of Construction* **2017**, 16, 9–21. <https://doi.org/10.7764/RDLC.16.1.9>. 338
339

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

340
341
342