

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Sostenibilidad y rendimiento: El acero para la construcción en Ecuador

David Alejandro Cerpa Carvajal

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 20 de julio de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

Sostenibilidad y rendimiento: El acero para la construcción en Ecuador

David Alejandro Cerpa Carvajal

Estefanía Cervantes, M. Eng, MDI.

Miguel Andrés Guerra, Ph.D. en Ingeniería Civil

Quito, 20 de julio de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: David Alejandro Cerpa Carvajal

Código: 00212018

Cédula de identidad: 1727555409

Lugar y fecha: Quito, 20 de julio de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En regiones propensas a terremotos como Ecuador, donde el Cinturón de Fuego del Pacífico expone las estructuras a una actividad sísmica significativa, es crucial garantizar un diseño de edificios resistente a sismos. Este estudio analiza el potencial para optimizar el peso de los elementos no estructurales en las edificaciones. Utilizando software de diseño de edificios, se modeló un edificio de estudio de caso de 6 pisos con variaciones en el diseño arquitectónico y materiales de mampostería comúnmente disponibles. Los resultados revelan que la selección estratégica de materiales y las modificaciones de diseño pueden reducir significativamente el peso del edificio (18,21%) cumpliendo al mismo tiempo con los requisitos de desempeño sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Esta investigación cuantifica la importante reducción de peso que se puede lograr mediante un diseño estratégico y una selección de materiales, ofreciendo un camino hacia prácticas de construcción más sostenibles y rentables en las regiones propensas a terremotos de Ecuador.

Palabras clave: Diseño Sísmico, Optimización de Peso, Distribución Arquitectónica y Construcción Sostenible

ABSTRACT

Ecuador's location on the Pacific Ring of Fire exposes it to significant seismic activity, evidenced by historic and important earthquakes around the country. Consequently, earthquake engineering plays a crucial role in the reinforced concrete design of structures, especially buildings. This study investigates how much influence can represent the weight optimization of non-structural elements in the seismic design of Ecuadorian structures. The study will explore the use of different masonry materials, such as load-bearing block, lightened block, and mambron bricks, commonly available in the national market. This study addresses this by investigating the interplay between architectural distributions and material selection, focusing on identifying strategies to optimize weight without compromising seismic performance. To address this issue, building design software will be used to create diverse models of a 6-story case study building. These models will incorporate variations in architectural design and commonly available masonry materials found in the Ecuadorian market. This information will be used to develop design guidelines that consider weight reduction strategies. This, in turn, can contribute to more cost-effective and sustainable construction practices in earthquake-prone regions of Ecuador, potentially leading to safer and more resource-efficient buildings.

Keywords: Seismic Design, Weight Optimization, Architectural Distribution, Sustainable Construction

TABLA DE CONTENIDO

<i>Introducción</i>	10
<i>Desarrollo del Tema</i>	13
<i>Conclusiones</i>	26
<i>Referencias bibliográficas</i>	28
<i>ANEXOS</i>	30

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 – Propiedades de Mampostería: Dimensiones y Peso Unitario.....	18
Tabla 2 – Comparación de Cargas Muertas para Diseños de Arquitectura Normal y Arquitectura Reducida.....	19
Tabla 3 – Perfiles de Acero Seleccionados para Vigas por Configuración de Mampostería..	19
Tabla 4 – Perfiles de Acero Optimizados para Viguetas por Configuración de Mampostería	20
Tabla 5 – Comparación de Peso de las Estructuras del Edificio (Versión de Arquitectura Normal vs. Arquitectura Reducida).....	23
Tabla 6 – Beneficios Económicos de la Reducción de Peso: Ahorros Potenciales de Costos por Tipo de Mampostería	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Comparación de Materiales de Mampostería en Diseños Originales y Reducidos de Peso	15
Figura 2 – Modelo 3D de la Estructura del Edificio	17
Figura 3 – Diseños Arquitectónicos Normales: Deriva entre Pisos vs. Altura del Piso (Eje X)	21
Figura 4 – Diseños Arquitectónicos Normales: Deriva entre Pisos vs. Altura del Piso (Eje Y)	21
Figura 5 – Deriva para la Versión de Arquitectura Reducida del Eje X	22
Figura 6 – Deriva para la Versión de Arquitectura Reducida del Eje Y	22

INTRODUCCIÓN

La investigación enfocada en los materiales de la construcción en el Ecuador se enmarca en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en los ODS 9, 11 y 13, los cuales enmarcan la equidad, infraestructura y desarrollo sostenible (Ramoneda). Se busca optimizar el uso de materiales, minimizar el impacto ambiental y garantizar la seguridad en las construcciones. Se enfoca en alternativas innovadoras para el acero y el hormigón, materiales con alta huella de carbono, buscando reducir su impacto ambiental a través del diseño arquitectónico. En definitiva, la investigación demuestra un compromiso con la construcción sostenible y el bienestar de las comunidades.

Los países en desarrollo como Ecuador enfrentan un desafío apremiante: conciliar el rápido desarrollo de infraestructura con un creciente compromiso con la sostenibilidad ambiental. Esto es particularmente crítico en regiones propensas a terremotos como Ecuador, donde la seguridad de las edificaciones sigue siendo primordial (Suarez).

Los métodos de construcción tradicionales a menudo se basan en materiales como el acero, que ofrecen un excelente desempeño sísmico. Sin embargo, la producción de acero tiene un costo ambiental significativo debido a las altas emisiones de CO₂ (Jones). Afortunadamente, Ecuador posee una industria siderúrgica bien establecida con numerosos productores y exportadores de perfiles y varillas de acero. Para evaluar la viabilidad económica del uso de acero en esta investigación, se realizó una investigación exhaustiva de mercado. Esta investigación involucró entrevistas en profundidad y análisis de actores clave dentro de la industria del acero, centrándose en tres aspectos críticos: costo, calidad y seguridad. Los datos resultantes sobre los precios estándar del acero por kilogramo serán cruciales para nuestro análisis posterior. Nos permitirá evaluar las implicaciones de costo del uso de acero en métodos de construcción optimizados en peso en comparación con materiales alternativos. Al comparar estos costos, podemos determinar si lograr la reducción de peso justifica cualquier aumento

potencial en los gastos de construcción. Este análisis es esencial para encontrar un equilibrio entre la seguridad estructural, el impacto ambiental y la viabilidad económica en regiones propensas a terremotos como Ecuador.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) describe prácticas estrictas de diseño sísmico para las estructuras, priorizando la resistencia a los terremotos (Mite-Anastacio et al.). La mampostería confinada (MC) es un método de construcción predominante en Ecuador debido a su rentabilidad y rapidez de construcción (Cevallos et al.). Esta investigación se centra en optimizar el peso de los elementos no estructurales en edificios de CM formalmente construidos utilizando materiales fácilmente disponibles como ladrillos y bloques de hormigón (Navas et al.; Macias et al.).

Comprender la respuesta sísmica de las estructuras existentes es fundamental para garantizar su seguridad durante los terremotos. La rigidez y la masa están bien establecidas como factores clave en el diseño sísmico (Tulebekova et al.). Sin embargo, a menudo existe una compensación entre el peso del edificio y la funcionalidad. Esta investigación explora el potencial de la optimización del peso en elementos no estructurales de edificios construidos con materiales de mampostería fácilmente disponibles como ladrillos y bloques de hormigón. El objetivo es lograr un equilibrio: reducir el peso del edificio para obtener posibles ganancias de eficiencia mientras se mantiene el desempeño sísmico de las estructuras. Al investigar la interacción entre el diseño arquitectónico y la selección de materiales, esta investigación explora la posibilidad de optimizar el peso en los edificios mientras minimiza o elimina cualquier impacto negativo en el desempeño sísmico de las estructuras.

En última instancia, esta investigación busca desarrollar lineamientos de diseño que promuevan prácticas de construcción con eficiencia de peso para edificios residenciales de poca altura en Quito, Ecuador. Estas pautas, considerando estrategias de reducción de peso (Stasiak-

Betlejewska and Potkány), pueden contribuir de esta manera a edificios más seguros, con mayor eficiencia de recursos y sostenibles en regiones propensas a terremotos.

DESARROLLO DEL TEMA

Esta investigación profundiza en la intrincada interacción entre la selección de materiales, las elecciones de diseño arquitectónico y las estrategias de optimización de peso. El objetivo principal es identificar métodos efectivos para mejorar el desempeño sísmico de las estructuras civiles. Para lograr esto, se empleará un enfoque de estudio de caso, centrándose en una tipología representativa de edificios de apartamentos de cinco pisos que se encuentra comúnmente en Quito, Ecuador.

El edificio de estudio de caso elegido es una estructura de cinco pisos con cada piso midiendo una altura estándar de 2.88 metros. Para lograr una comprensión matizada de la respuesta del edificio a la actividad sísmica, esta investigación se centrará en una unidad de apartamento completa dentro del edificio. En primer lugar, el análisis identificará los materiales de construcción específicos utilizados en toda la unidad. En segundo lugar, la investigación explorará las opciones de diseño arquitectónico implementadas dentro del apartamento, incluidos los elementos portantes y las posibles características de distribución que podrían influir en la respuesta sísmica del edificio.

Para evaluar de manera integral la interacción entre la selección de materiales, el desempeño sísmico y la rentabilidad, esta investigación empleará dos estudios de caso. El primer caso de estudio analizará un diseño de arquitectura normal construido con seis materiales de mampostería diferentes: bloques portantes, bloques livianos y ladrillos mamborrón de diferentes espesores. Esto permite una comparación directa de cómo las propiedades del material influyen en el desempeño estructural. El segundo caso de estudio utilizará los mismos seis materiales de mampostería, pero se implementará dentro de un diseño arquitectónico de peso reducido.

Para evaluar el impacto de la selección de materiales y el diseño arquitectónico en el peso y el desempeño sísmico, se crearán y analizarán dos versiones de diseño para cada tipo de edificio elegido:

1. **Arquitectura Original:** Esta versión representará las prácticas de construcción estándar en Quito, utilizando los materiales de mampostería disponibles localmente y aprobados por la normativa. Esto establecerá el método de construcción de Arquitectura Original para compararlo con la versión de Peso Reducido. El software de análisis estructural ETABS se utilizará para modelar la versión de Arquitectura Original y determinar su peso y parámetros clave de desempeño sísmico, como cargas, deriva entre pisos y cortante basal.
2. **Versión de Peso Reducido:** Esta versión tiene como objetivo lograr una reducción del 30% en el volumen del muro en comparación con la versión de Arquitectura Original. Esta reducción se logrará a través de un proceso de diseño colaborativo entre un arquitecto e ingeniero.

En Quito, Ecuador, garantizar la seguridad de los edificios durante los terremotos es una preocupación creciente, pero también lo es mantener la asequibilidad en la construcción. Esta investigación aborda este desafío explorando soluciones de diseño innovadoras pero prácticas. Si bien se prioriza el uso de materiales aprobados y fácilmente disponibles, el proyecto se adentra en enfoques no convencionales que aprovechan todo el potencial de estos materiales. Ejemplos de ello incluyen la optimización de la distribución de los pisos para la distribución del peso y la posible integración de elementos livianos. Adicionalmente, la investigación explorará modificaciones arquitectónicas que reduzcan el peso, como vanos ubicados estratégicamente o la minimización de elementos no estructurales.

Este estudio analiza la relación interconectada entre la selección de materiales y el diseño arquitectónico para identificar estrategias para optimizar el desempeño sísmico de edificios residenciales de poca altura en Quito, Ecuador.

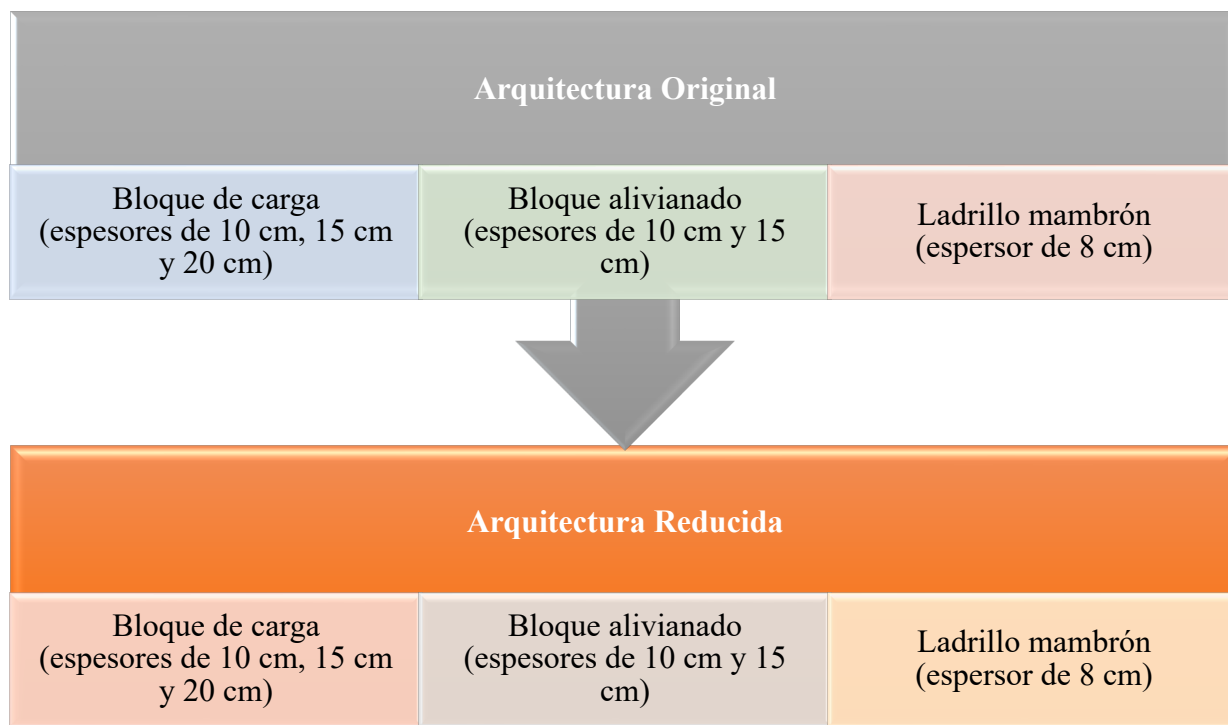


Figura 1 – Comparación de Materiales de Mampostería en Diseños Originales y Reducidos de Peso

Este estudio propone un análisis multivariado para evaluar la interacción entre las opciones de diseño y su correspondiente desempeño estructural bajo eventos sísmicos frecuentes en Quito. Esta evaluación combinada tiene el potencial de revelar conocimientos críticos que se pueden aprovechar para optimizar las estrategias de diseño de edificios dentro del contexto sísmico de la ciudad.

Para facilitar una comparación rigurosa entre el diseño de arquitectura original y la versión de arquitectura de peso reducido, esta investigación aprovechará el software de análisis estructural ETABS. El software ETABS se utilizará para generar un modelo preciso del diseño de peso reducido, permitiendo la cuantificación de su peso y características de desempeño sísmico. Los datos extraídos de ETABS, que abarcan métricas críticas como el peso y la deriva entre pisos,

luego se someterán a un análisis y visualización más profundos utilizando software como MATLAB. Esto puede implicar el desarrollo de gráficos completos para dilucidar visualmente las variaciones en la deriva del edificio en diferentes niveles de piso para ambas iteraciones del diseño.

Para evaluar de manera integral la viabilidad económica de la construcción optimizada en peso junto con sus beneficios sísmicos, esta investigación incorpora un análisis de costos centrado en los precios de los materiales. Durante el análisis del caso de estudio, identificaremos los materiales de mampostería específicos utilizados tanto en el diseño original como en el diseño de peso reducido. Tras esta identificación, recopilaremos datos sobre el costo por kilogramo de cada material de los seis diferentes productores de mampostería entrevistados en Quito. Estos datos se compilarán en una tabla o gráfico para facilitar la comparación, potencialmente integrados dentro de la "Figura 1: Comparación de materiales de mampostería en diseños originales y reducidos de peso". Al comparar el peso de los diseños original y de peso reducido obtenidos del software ETABS con el costo por kilogramo de cada material, podemos estimar la diferencia general en los costos de material entre los dos enfoques de construcción. Esta información se presentará y discutirá en la sección de resultados, destacando las posibles implicaciones de costo de la optimización del peso para proyectos de construcción en Quito. El análisis de costos, detallado anteriormente en esta sección de metodología, se utilizará para evaluar la viabilidad económica del diseño de peso reducido junto con sus beneficios sísmicos. Se realizó un análisis estructural del diseño de arquitectura normal y las versiones de peso reducido para la tipología de edificio utilizando el software ETABS. Las propiedades de los materiales para cada tipo de unidad de mampostería se asignaron de acuerdo con las normas vigentes. La geometría del edificio, incluido el espesor de los muros, se reflejó con precisión en los modelos.

Las cargas sísmicas se aplicaron de acuerdo con la norma ecuatoriana de construcción para Quito. Se utilizó el método de carga estática equivalente, considerando un espectro de respuesta de diseño específico para la zona sísmica de Quito. La Figura 1 muestra el modelo de construcción sometido a la distribución de carga sísmica.

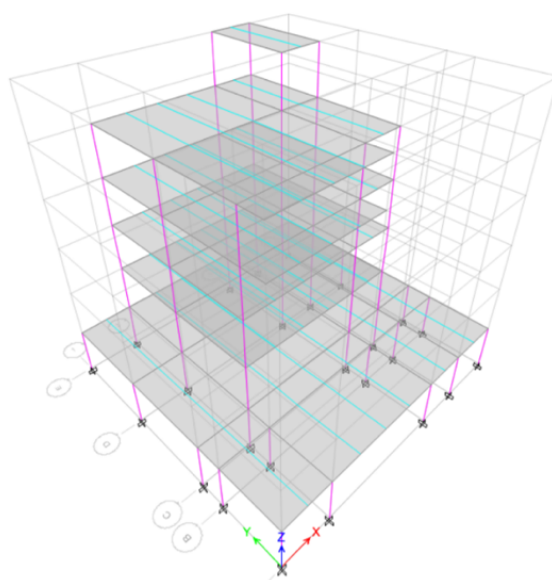


Figura 2 – Modelo 3D de la Estructura del Edificio

El peso unitario de cada material de mampostería utilizado en el estudio se obtuvo de un repositorio de diferentes materiales de mampostería recolectados en Ecuador mantenido por (Espinosa and Vargas). El peso unitario representa el peso por unidad de volumen de la unidad de mampostería y se obtuvo directamente de los datos del repositorio. La Tabla 1 especifica los valores de peso unitario para cada material y espesor de mampostería que se utilizará durante este análisis.

Tabla 1 – Propiedades de Mampostería: Dimensiones y Peso Unitario

Tipo de Mampostería	Espesores (cm)	Peso (kg)	Peso Unitario (kg/m³)
Bloque de carga	10	8.44	1068.52
Bloque de carga	15	10.94	917.39
Bloque de carga	20	14.12	901.60
Bloque alivianado	10	4.65	783.18
Bloque alivianado	15	6.30	655.23
Ladrillo mambón	8	6.23	1481.66

La información de peso unitario se utilizó para calcular la carga muerta por unidad de volumen de mampostería que actúa sobre cada componente del edificio dentro de los modelos ETABS. Esto implicó multiplicar el peso unitario de cada material por el volumen correspondiente del componente de mampostería en el modelo. El volumen de cada componente se determinó en base a la información de geometría del edificio incorporada a los modelos ETABS.

Se incorporaron componentes adicionales de carga muerta para tener en cuenta el peso propio de los acabados, falsos techos, instalaciones del edificio, baldosas y la losa de acero. Se utilizaron valores estándar de la industria para determinar el peso de estos componentes. La Tabla 2 presenta las cargas muertas calculadas que actúan sobre diferentes componentes del edificio para la tipología específica de edificio que se está analizando. Se dedican columnas separadas a las versiones de arquitectura normal y peso reducido, lo que permite una fácil comparación de la distribución de la carga muerta entre los diseños. También se proporciona la carga muerta total para cada versión.

Tabla 2 – Comparación de Cargas Muertas para Diseños de Arquitectura Original y Arquitectura Reducida

Tipo de Mampostería	Espesores (cm)	Carga Muerta con Arquitectura Original (kg/m²)	Carga Muerta con Arquitectura Reducida (kg/m²)
Bloque de carga	10	310.10	251.60
Bloque de carga	15	366.30	290.90
Bloque de carga	20	444.10	345.40
Bloque alivianado	10	258.00	215.10
Bloque alivianado	15	294.50	240.60
Ladrillo mambrón	8	332.90	267.50

Para lograr un diseño de acero óptimo, el estudio exploró perfiles en forma de W (secciones W) tanto para vigas como para viguetas. Se analizaron diferentes tamaños de perfil para identificar la solución más eficiente en términos de uso de material. El análisis consideró variaciones en las secciones de las viguetas desde W8x13 hasta W12x14 y en las secciones de las vigas desde W14x48 hasta W14x82. Estas variaciones impactan directamente en los cálculos de peso debido a las diferentes cantidades de acero en cada perfil.

Tabla 3 – Perfiles de Acero Seleccionados para Vigas por Configuración de Mampostería

Tipo de Mampostería	Espesores (cm)	Perfiles de acero para Arquitectura Original	Perfiles de acero para Arquitectura Reducida
Bloque de carga	10	W14x68	W14x53
Bloque de carga	15	W14x68	W14x68
Bloque de carga	20	W14x74	W14x68
Bloque alivianado	10	W14x53	W14x48
Bloque alivianado	15	W14x68	W14x53
Ladrillo mambrón	8	W14x68	W14x68

Para minimizar el uso de material al tiempo que se garantiza la integridad estructural, se identifican perfiles óptimos de vigas de acero para cada caso de carga muerta y variación de mampostería. La Tabla 3 resume las selecciones finales de vigas para las 12 configuraciones de mampostería. Además, para una visión general completa de la optimización del perfil de acero, la Tabla 4 presenta los perfiles finales de viguetas elegidos para cada caso de carga muerta y la configuración de mampostería correspondiente.

Tabla 4 – Perfiles de Acero Optimizados para Viguetas por Configuración de Mampostería

Tipo de Mampostería	Espesores (cm)	Perfiles de acero para Arquitectura Original	Perfiles de acero para Arquitectura Reducida
Bloque de carga	10	W10x15	W10x15
Bloque de carga	15	W8x13	W10x15
Bloque de carga	20	W10x12	W10x15
Bloque alivianado	10	W10x12	W10x12
Bloque alivianado	15	W10x15	W10x15
Ladrillo mambón	8	W10x15	W10x15

Se realizó un análisis detallado del peso de los materiales para cada una de las 12 configuraciones de mampostería. Este análisis consideró el peso de varios perfiles de acero utilizados en vigas (detallado en la Tabla 3) y viguetas (detallado en la Tabla 4). Se excluyó el peso de las columnas ya que fueron diseñadas como secciones huecas de peso constante con construcción compuesta de concreto y acero.

Posteriormente, se prestó meticulosa atención al examen de las derivas entre pisos. Los valores de deriva entre pisos para cada nivel se extrajeron de los modelos ETABS, considerando las variaciones en la carga muerta debido al tipo específico de unidad de mampostería utilizada en cada versión del diseño. Este análisis aseguró que las derivas entre pisos se mantuvieran dentro de los límites permitidos establecidos por la NEC. La NEC especifica un valor máximo permitido de deriva entre pisos basado en el factor de reducción elegido (R) y la cortante basal calculada.

El comportamiento de la deriva de las estructuras del edificio se evaluó visualmente utilizando gráficos. Estos gráficos representaban la altura del piso (eje Y) frente a los valores de deriva entre pisos (eje X). Se crearon gráficos separados tanto para el diseño arquitectónico normal como para el de peso reducido. Cada variante de diseño tenía dos gráficos correspondientes: uno para las derivas del eje X y otro para las derivas del eje Y. Este enfoque de visualización permite una comprensión completa de las deformaciones laterales que experimentan los edificios bajo cargas sísmicas en ambas direcciones, considerando todos los casos de mampostería aplicados.

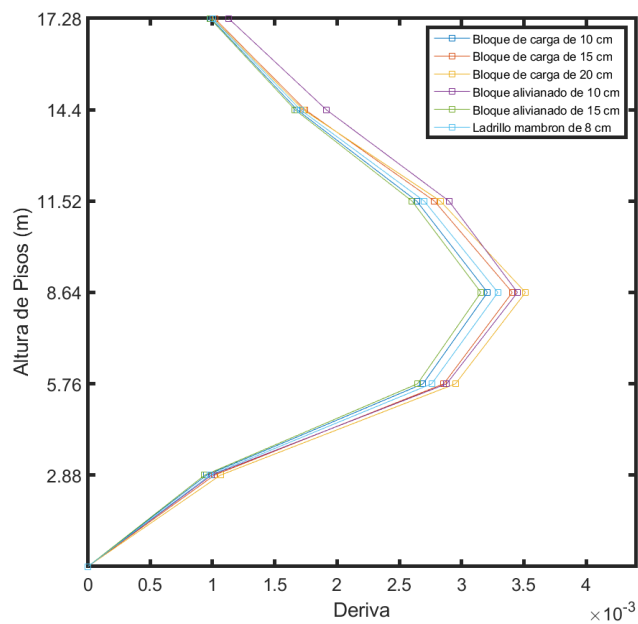


Figura 3 – Diseños Arquitectónicos Original: Deriva entre Pisos vs. Altura del Piso (Eje X)

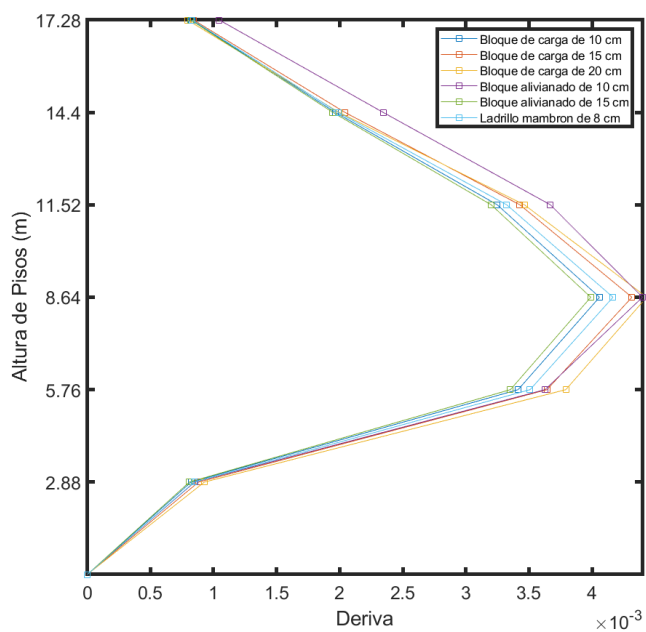


Figura 4 – Diseños Arquitectónicos Original: Deriva entre Pisos vs. Altura del Piso (Eje Y)

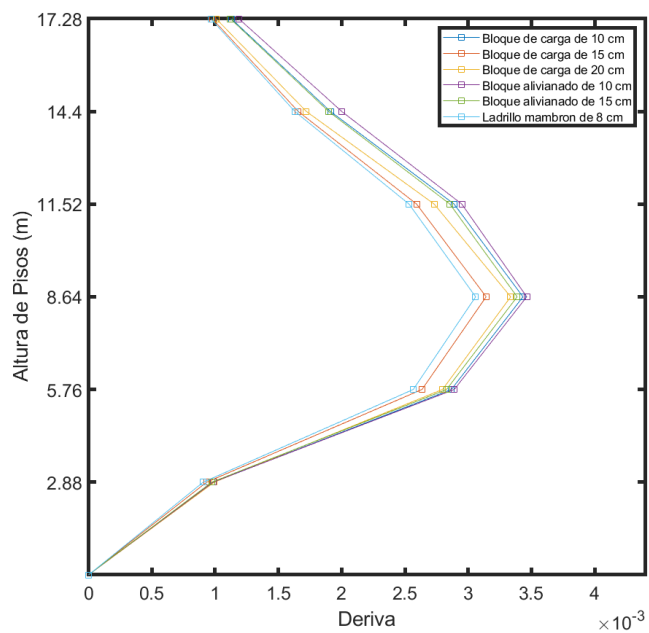


Figura 5 – Deriva para la Versión de Arquitectura Reducida del Eje X

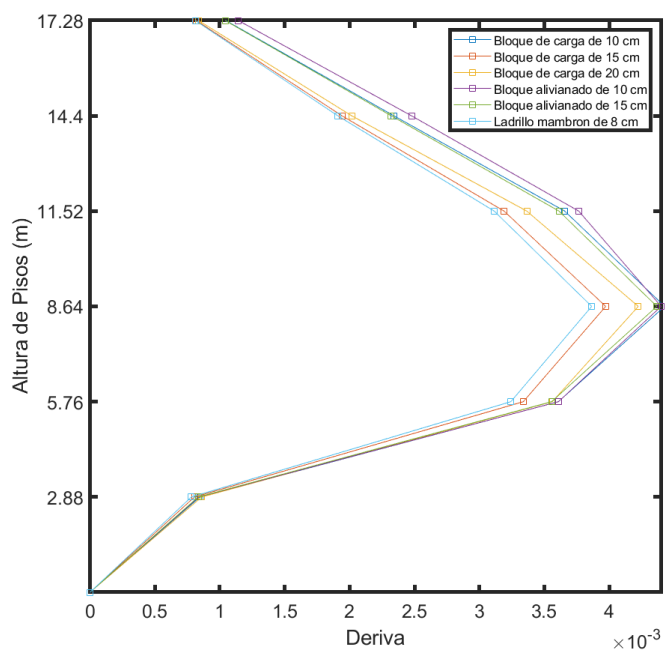


Figura 6 – Deriva para la Versión de Arquitectura Reducida del Eje Y

El análisis de deriva entre pisos, presentado en las Figuras 3, 4, 5 y 6, demuestra un desempeño satisfactorio tanto para las versiones de arquitectura normal como para las versiones de arquitectura reducida de las estructuras del edificio. Ninguna de las configuraciones de mampostería superó el límite máximo permitido de deriva entre pisos de 0.0044, según lo establecido por la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).

Este hallazgo indica que ambas versiones del edificio poseen una rigidez lateral adecuada bajo cargas sísmicas para controlar las deformaciones dentro de límites aceptables tanto en la dirección del eje X como en la del eje Y. Los gráficos también revelan una tendencia similar en el comportamiento de la deriva a lo largo de ambos ejes, lo que sugiere una respuesta bien equilibrada de las estructuras a la excitación sísmica.

Además de vigas, viguetas y columnas, el análisis también incorporó el peso de los muros del edificio. Al combinar estos componentes de peso, se determinó el peso total de la estructura del edificio para cada caso de carga muerta y configuración de mampostería. La Tabla 5 resume estos pesos totales, permitiendo una comparación completa de la eficiencia de peso entre la versión de arquitectura normal y las versiones de diseño de arquitectura reducida en todas las variaciones de mampostería.

Tabla 5 – Comparación de Peso de las Estructuras del Edificio (Versión de Arquitectura Original vs. Arquitectura Reducida)

Tipo de Mampostería	Espesores (cm)	Peso con Arquitectura Original (Ton)	Peso con Arquitectura Reducida (Ton)
Bloque de carga	10	139.80	130.85
Bloque de carga	15	140.15	139.80
Bloque de carga	20	143.96	140.15
Bloque alivianado	10	129.62	126.45
Bloque alivianado	15	140.15	130.85
Ladrillo mambrón	8	140.15	139.80

La Tabla 5 resume los cálculos de peso total para cada configuración de mampostería y caso de carga muerta. Al analizar los datos de la versión base, observamos el peso máximo de 143.96

toneladas para el bloque de carga de 20 cm de espesor. Esto se alinea con las expectativas ya que este tipo de material tiene la carga muerta más alta debido a su peso. Por el contrario, el peso mínimo de 129.62 toneladas se da con el bloque alivianado de 10 cm, lo que nuevamente demuestra la influencia del peso del material en el peso total del edificio.

La versión de la arquitectura reducida presenta una tendencia similar, con un peso máximo de 140.15 toneladas (bloque de carga de 20 cm) y un mínimo de 126.45 toneladas (bloque alivianado de 10 cm). Es importante destacar que la versión con arquitectura reducida consistentemente logra pesos más bajos en comparación con la arquitectura normal. Esto se traduce en una reducción significativa de 3.80 toneladas por estructura, lo que representa una mejora del 18.21% en la eficiencia de peso del diseño optimizado.

La arquitectura reducida en el diseño optimizado se traduce en importantes beneficios económicos durante la construcción. Los costos de materiales son un factor crítico en los presupuestos generales, y un diseño más liviano ofrece ahorros significativos. Para cuantificar esta ventaja, se estableció un costo de material representativo por kilogramo basado en una investigación de mercado centrada en los principales productores de acero ecuatorianos reconocidos por sus materiales de alta calidad ((Novacero): USD 1.45/kg, (AceroCenter): USD 1.39/kg, (Dipac): USD 1.42/kg). Teniendo en cuenta estos datos, se utilizó un estimado conservador de USD 1.42/kg para el análisis de costos.

Tabla 6 – Beneficios Económicos de la Reducción de Peso: Ahorros Potenciales de Costos por Tipo de Mampostería

Tipo de Mampostería	Costo para Arquitectura Original (USD)	Costo para Arquitectura Reducida (USD)	Ahorro Potencial (USD)
Bloque de carga	\$198,516	\$185,807	\$12,709
Bloque de carga	\$199,013	\$198,516	\$497
Bloque de carga	\$204,423	\$199,013	\$5,410
Bloque alivianado	\$184,060	\$179,559	\$4,501
Bloque alivianado	\$199,013	\$185,807	\$13,206
Ladrillo mampostería	\$199,013	\$198,516	\$497

La Tabla 6 revela ahorros de costos sustanciales que se pueden lograr mediante la reducción de peso, que van desde \$497 a \$13,206 para la mayoría de las configuraciones de mampostería. Esto se traduce en una ventaja financiera significativa para el diseño optimizado. Si bien se produjeron ligeros aumentos de costos en configuraciones específicas debido a posibles elementos de soporte adicionales, los resultados generales destacan de manera abrumadora los beneficios económicos de la reducción de peso.

Para cuantificar esta ventaja, se estableció un costo de material representativo por kilogramo basado en una investigación de mercado centrada en los principales productores de acero ecuatorianos. Utilizando un estimado conservador de USD 1.42/kg, la Tabla 6 revela ahorros de costos potenciales de hasta \$13,206 que se pueden lograr mediante la reducción de peso en varias configuraciones de mampostería.

Los resultados de esta investigación brindan información valiosa para las partes interesadas en la industria de la construcción de Quito. Los arquitectos e ingenieros pueden utilizar estos hallazgos para desarrollar guías de diseño prácticas para prácticas de construcción rentables y sísmicamente seguras. La investigación futura puede explorar una gama más amplia de tipologías de edificios e incorporar análisis de costos para optimizar aún más el diseño de edificios para la reducción de peso y el desempeño sísmico en regiones propensas a terremotos.

CONCLUSIONES

En esta investigación se examinó exhaustivamente el potencial de optimizar el peso en edificios residenciales de baja altura en Quito, Ecuador, una zona con alta actividad sísmica. Se tomó como base una tipología representativa de edificios de apartamentos de cinco pisos, los hallazgos revelan que la selección cuidadosa de materiales y la implementación de modificaciones de diseño pueden reducir significativamente el peso total de la estructura sin comprometer su desempeño sísmico. Esto se traduce en ventajas como una mayor eficiencia estructural, un mejor comportamiento ante sismos y una mayor flexibilidad de diseño.

En definitiva, esta investigación aporta valiosos conocimientos para optimizar el peso en edificios residenciales de baja altura en regiones sísmicamente activas como Quito. La aplicación de las estrategias identificadas puede contribuir al diseño y construcción de edificaciones más seguras, sostenibles y rentables, promoviendo un futuro más resiliente para la ciudad, esto tiene el potencial de mejorar la eficiencia de la construcción y la rentabilidad en el contexto sísmico de Quito.

Los resultados muestran que la selección estratégica de materiales y las modificaciones de diseño pueden reducir significativamente el peso del edificio en un 18,21% sin comprometer el desempeño sísmico según la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Esto tiene el potencial de mejorar la eficiencia de la construcción y la rentabilidad en el contexto sísmico de Quito.

Un análisis de costos reveló ahorros potenciales que van desde \$497.0 a \$13,206.0 por edificio debido al uso reducido de materiales. Estos hallazgos sugieren que el diseño eficiente en peso puede contribuir a una industria de la construcción más sostenible y consciente de los recursos en áreas propensas a terremotos.

En conclusión, este proyecto de investigación ofrece una gran cantidad de conocimientos valiosos que se pueden aprovechar estratégicamente para impulsar el desarrollo de prácticas de

construcción sostenibles y resistentes a terremotos, no solo en Quito sino también en innumerables regiones del mundo propensas a sismos. Al promover con entusiasmo la adopción de diseños eficientes en peso, este estudio ha dado un paso significativo hacia la creación de una industria de la construcción más sostenible y consciente de los recursos en zonas sísmicamente activas. Esto, a su vez, abre el camino hacia un futuro donde la seguridad humana y la responsabilidad ambiental sean consideraciones primordiales en el proceso de construcción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AceroCenter. “AceroCenter.” *AceroCenter*, 20 May 2024, <https://acerocenter.com.ec>.
- Cevallos, Oscar A., et al. “Production and Quality Levels of Construction Materials in Andean Regions: A Case Study of Chimborazo, Ecuador.” *Journal of Construction in Developing Countries*, vol. 22, no. 1, 2017, pp. 115–36. *DOI.org (Crossref)*, <https://doi.org/10.21315/jcdc2017.22.1.7>.
- Dipac. “DIPAC - Los mejores productos de acero.” *DIPAC*, 20 May 2024, <https://dipacmanta.com/>.
- Espinosa, Estuardo Páez, and Carlos Andrés Páez Vargas. “Determinación de la carga permanente correspondiente a distintos tipos de mamposterías en edificaciones de vivienda.” *revistapuce*, no. 106, 106, Apr. 2018. www.revistapuce.edu.ec, <https://doi.org/10.26807/revpuce.v0i106.133>.
- Jones, Steve. *Steel Production & Environmental Impact*. 2014, <http://www.greenspec.co.uk/building-design/steel-products-and-environmental-impact/>.
- Macias, Jose, et al. “Embodied and Operational Energy Assessment of Different Construction Methods Employed on Social Interest Dwellings in Ecuador.” *Energy and Buildings*, vol. 151, Sept. 2017, pp. 107–20. *ScienceDirect*, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016>.
- Mite-Anastacio, Fernando, et al. “Structural Behavior of Cemented Bahareque for Social Housing: A Case Study in Guayaquil City, Ecuador.” *Frontiers in Built Environment*, vol. 8, Oct. 2022. *Frontiers*, <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.922397>.
- Navas, Luis, et al. *AN EVALUATED COMPARISON BETWEEN THE MOLECULE AND STEEL FRAMING CONSTRUCTION SYSTEMS – IMPLICATIONS FOR THE SEISMIC VULNERABLE ECUADOR*.

Novacero. *Inicio - Novacero*. 20 May 2024, <https://www.novacero.com/>.

Ramoneda, Clara. “Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en el sector de la construcción.” *Knauf Insulation*, 5 Sept. 2019, <https://aislamientoysostenibilidad.es/los-objetivos-de-desarrollo-sostenible-ods-en-el-sector-de-la-construccion/>.

Stasiak-Betlejewska, Renata, and Marek Potkány. “Construction Costs Analysis and Its Importance to the Economy.” *Procedia Economics and Finance*, vol. 34, Jan. 2015, pp. 35–42. *ScienceDirect*, [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01598-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01598-1).

Suarez, Gerardo. *Seismicity, Fault Plane Solutions, Depth of Faulting, and Active Tectonics of the Andes of Peru, Ecuador, and Southern Colombia - Suárez - 1983 - Journal of Geophysical Research: Solid Earth - Wiley Online Library*. 10 Dec. 2003, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB088iB12p10403>.

Tulebekova, Saule, et al. “Modeling Stiffness of Connections and Non-Structural Elements for Dynamic Response of Taller Glulam Timber Frame Buildings.” *Engineering Structures*, vol. 261, June 2022, p. 114209. *ScienceDirect*, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114209>.



A better world with Quality!

**PROCEEDINGS OF THE
SIXTH INTERNATIONAL
CONFERENCE ON QUALITY
ENGINEERING AND
MANAGEMENT**

**QUALITY
IN MOTION**

13 - 14 June 2024

Universitat de Girona

Girona, Spain

Steel Improvement: Ecuador Building Case

Cervantes, A.E.¹⁾²⁾, Cerpa, D.A.¹⁾ and Guerra, M.A.¹⁾

¹⁾ Universidad San Francisco de Quito

²⁾ University of Minho

STRUCTURED ABSTRACT

In earthquake-prone regions like Ecuador, where the Pacific Ring of Fire exposes structures to significant seismic activity, ensuring earthquake-resistant building design is crucial. This study delves into the potential for optimizing the weight of non-structural elements in buildings. Using building design software, a 6-story case study building was modeled with variations in architectural design and commonly available masonry materials. The results reveal that strategic material selection and design modifications can significantly reduce building weight (18.21%) while adhering to Ecuadorian Building Code (NEC) seismic performance requirements. This research quantifies the substantial weight reduction achievable through strategic design and material selection, offering a pathway towards more sustainable and cost-effective construction practices in earthquake-prone regions of Ecuador.

Keywords: Seismic Design, Weight Optimization, Architectural Distribution, Sustainable Construction

INTRODUCTION

Developing nations like Ecuador face a pressing challenge: reconciling rapid infrastructure development with a growing commitment to environmental sustainability. This is particularly critical in earthquake-prone regions like Ecuador, where building safety remains paramount (Suarez, 2003).

Traditional construction methods often rely on materials like steel, which offer excellent seismic performance. However, steel production comes with a significant environmental cost due to high CO₂ emissions (Jones, 2014). Fortunately, Ecuador possesses a well-established steel industry with numerous producers and exporters of steel profiles and rods. To assess the economic viability of using steel in this research, a comprehensive market investigation was conducted. This investigation involved in-depth interviews and analysis of key players within the steel industry, focusing on three critical aspects: cost, quality, and safety. The resulting data on standard steel prices per kilogram will be crucial for our later analysis. It will allow us to evaluate the cost implications of using steel in weight-optimized construction methods compared to alternative materials. By comparing these costs, we can determine if achieving weight reduction justifies any potential increase in construction expenses. This analysis is essential for finding a balance between structural safety, environmental impact, and economic viability in earthquake-prone regions like Ecuador.

Ecuadorian Building Code (NEC) outlines strict seismic design practices for structures, prioritizing earthquake resistance (Mite-Anastacio *et al.*, 2022). Confined masonry (CM) is a prevalent construction method in Ecuador due to its cost-effectiveness and speed of construction (Cevallos *et al.*, 2017). This research focuses on optimizing weight in non-structural elements of formally constructed CM buildings using readily available materials like bricks and concrete blocks (Macias *et al.*, 2017; Navas, Caiza and Toulkeridis, no date).

Understanding the seismic response of existing structures is critical for ensuring their safety during earthquakes. Stiffness and mass are well-established as key factors in seismic design (Tulebekova *et al.*, 2022). However, a trade-off often exists between building weight and functionality. This research explores the potential of weight optimization in non-structural elements of buildings constructed with readily available masonry materials like bricks and concrete blocks. The goal is to strike a balance: reducing building weight for potential efficiency gains while maintaining the seismic performance of structures. By investigating the interaction between architectural design and material selection, this research explores the

possibility of optimizing weight in buildings while minimizing or eliminating any negative impact on the seismic performance of structures.

This research ultimately seeks to develop design guidelines that promote weight-efficient construction practices for low-rise residential buildings in Quito, Ecuador. These guidelines, considering weight reduction strategies (Stasiak-Betlejewska and Potkány, 2015), in such a way, can contribute to safer, more resource-efficient, and sustainable buildings in earthquake-prone regions.

RESEARCH METODOLOGY

This research delves into the intricate interplay between material selection, architectural design choices, and weight optimization strategies. The primary objective is to identify effective methods for enhancing the seismic performance of civil structures. To achieve this, a case study approach will be employed, focusing on a representative five-story apartment building typology commonly encountered in Quito, Ecuador.

The chosen case study building is a five-story structure with each floor measuring a standard height of 2.88 meters. To achieve a nuanced understanding of the building's response to seismic activity, this research will focus on a single, complete apartment unit within the building. First, the analysis will identify the specific building materials used throughout the unit's construction. Second, the research will explore the architectural design choices implemented within the apartment, including both weight-bearing elements and potential layout features that could influence the building's seismic response.

To comprehensively evaluate the interplay between material selection, seismic performance, and cost-effectiveness, this research will employ two case studies. The first case study will analyze a normal architecture building design constructed with six different masonry materials: load-bearing blocks, lightweight blocks, and mambron bricks of varying thicknesses. This allows for a direct comparison of how material properties influence structural performance. The second case study will utilize the same six masonry materials but will be implemented within a weight reduced architectural design.

To evaluate the impact of material selection and architectural design on weight, and seismic performance, two design versions will be created and analyzed for each chosen building type:

1. **Original Architecture:** This version will represent standard construction practices in Quito, utilizing the locally available and regulation-approved masonry materials. This will establish the Original Architecture construction method for comparison with the Weight Reduced version. Structural analysis software ETABS will be used to model the Original Architecture version and determine its weight and key seismic performance parameters, such as loads, story drift, and basal shear.
2. **Weight Reduced Version:** This version aims to achieve a 30% reduction in wall volume compared to the Original Architecture version. This reduction will be achieved through a collaborative design process involving an architect and engineer.

In Quito, Ecuador, ensuring the safety of buildings during earthquakes is a growing concern, but so is maintaining affordability in construction. This research tackles this challenge by exploring innovative yet practical design solutions. While prioritizing the use of approved and readily available materials, the project delves into unconventional approaches that unlock the full potential of these materials. Examples include optimizing floor layouts for weight distribution and potentially integrating lightweight. Additionally, the research will explore architectural modifications that reduce weight, such as strategically placed openings or minimizing non-structural elements.

This research analyzes the interconnected relationship between material selection and architectural design to identify strategies for optimizing the seismic performance of low-rise residential buildings in Quito, Ecuador.

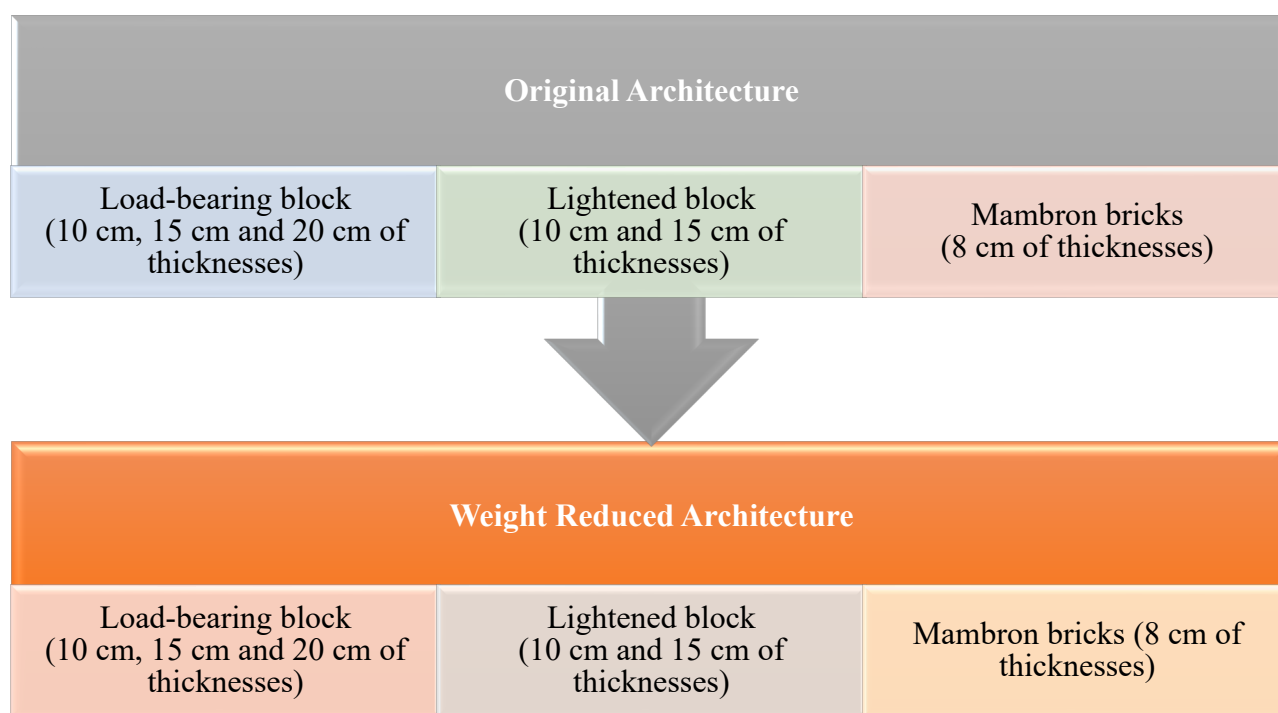


Figure 1 – Comparison of Masonry Materials in Original and Weight-Reduced Designs

This study proposes a multivariate analysis to assess the interplay between design options and their corresponding structural performance under seismic events prevalent in Quito. This combined evaluation has the potential to unveil critical insights that can be leveraged to optimize building design strategies within the seismic context of the city.

To facilitate a rigorous comparison between the Original Architecture design and the Weight Reduced Architecture version, this investigation will leverage ETABS structural analysis

software. ETABS will be employed to generate a precise model of the Weight Reduced design, enabling the quantification of its weight and seismic performance characteristics. The data extracted from ETABS, encompassing critical metrics such as weight and inter-story drift, will then undergo further in-depth analysis and visualization using software like MATLAB. This may involve the development of comprehensive graphs to visually elucidate the variations in building drift across different floor levels for both design iterations.

To comprehensively evaluate the economic feasibility of weight-optimized construction alongside its seismic benefits, this research incorporates a cost analysis focusing on material prices. During the case study analysis, we will identify the specific masonry materials used in both the original and weight-reduced designs. Following this identification, we will gather data on the cost per kilogram of each material from the six different masonry producers interviewed in Quito. This data will be compiled into a table or chart for easy comparison, potentially integrated within "Figure 1: Comparison of Masonry Materials in Original and Weight-Reduced Designs." By comparing the weight of the original and weight-reduced designs obtained from ETABS software with the cost per kilogram of each material, we can estimate the overall difference in material costs between the two construction approaches. This information will be presented and discussed in the results section, highlighting the potential cost implications of weight optimization for construction projects in Quito. The cost analysis, detailed earlier in this methodology section, will be used to assess the economic feasibility of the weight-reduced design alongside its seismic benefits.

RESULTS

Structural analysis of the normal architecture design and weight-reduced versions for the building typology was performed using ETABS software. The material properties for each type of masonry unit were assigned according to the relevant standards. The geometry of the building, including wall thicknesses, was accurately reflected in the models.

The seismic loads were applied according to the Ecuadorian construction standard for Quito. The equivalent static load method was used, considering a specific design response spectrum for the Quito seismic zone. Figure 1 shows the construction model subjected to seismic load distribution.

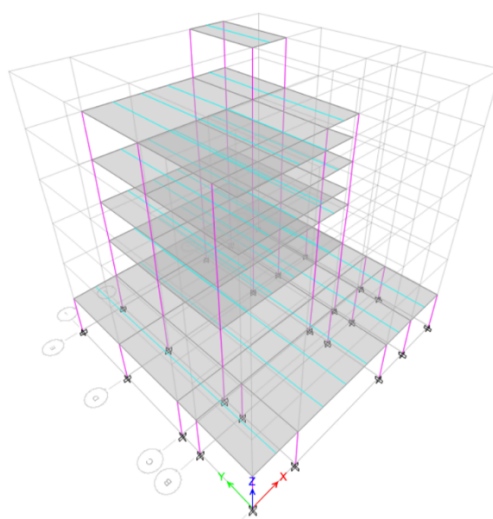


Figure 2 – 3D Model of the Building Structure

The unit weight of each masonry material used in the study was obtained from a repository of different masonry materials collected in Ecuador maintained by (Espinosa and Vargas, 2018). The unit weight represents the weight per unit volume of the masonry unit and was directly obtained from the repository data. Table 1 specifies the unit weight values for each material and thickness of masonry to be used during this analysis.

Table 1 – Properties of Masonry Units: Dimensions and Unit Weight

Type of masonry	Thicknesses (cm)	Weight (kg)	Unit Weight (kg/m ³)
Load-bearing block	10	8.44	1068.52
Load-bearing block	15	10.94	917.39
Load-bearing block	20	14.12	901.60
Lightened block	10	4.65	783.18
Lightened block	15	6.30	655.23
Mambon bricks	8	6.23	1481.66

The unit weight information was used to calculate the dead load per unit volume of masonry acting on each building component within the ETABS models. This involved multiplying the unit weight of each material by the corresponding volume of the masonry component in the model. The volume of each component was determined based on the building geometry information incorporated into the ETABS models.

Additional dead load components were incorporated to account for the self-weight of finishes, false ceilings, building installations, floor tiles, and the steel deck. Standard industry values were used to determine the weight of these components. Table 2 presents the calculated dead loads acting on different building components for the specific building typology being analyzed. Separate columns are dedicated to the normal architecture and weight-reduced versions, allowing for easy comparison of dead load distribution between the designs. The total dead load for each version is also provided.

Table 2 – Comparison of Dead Loads for Normal Architecture and Weight-Reduced Designs

Type of masonry	Thicknesses (cm)	Dead loads for Normal Architecture version (kg/m ²)	Dead loads for Weight Reduced version (kg/m ²)
Load-bearing block	10	310.10	251.60
Load-bearing block	15	366.30	290.90
Load-bearing block	20	444.10	345.40
Lightened block	10	258.00	215.10
Lightened block	15	294.50	240.60
Mambon bricks	8	332.90	267.50

To achieve an optimal steel design, the study explored W-shaped profiles (W sections) for both beams and joists. Different profile sizes were analyzed to identify the most efficient solution in terms of material usage. The analysis considered variations in joist sections from W8x13 to W12x14 and beam sections from W14x48 to W14x82. These variations directly impact weight calculations due to the differing amounts of steel in each profile.

Table 3 – Selected Steel Profiles for Beams by Masonry Configuration

Type of masonry	Thicknesses (cm)	Steel profile for normal architecture version	Steel profile for weight-reduced version
Load-bearing block	10	W14x68	W14x53
Load-bearing block	15	W14x68	W14x68
Load-bearing block	20	W14x74	W14x68
Lightened block	10	W14x53	W14x48
Lightened block	15	W14x68	W14x53
Mambon bricks	8	W14x68	W14x68

To minimize material usage while ensuring structural integrity, optimal steel beam profiles were identified for each dead load case and masonry variation. Table 3 summarizes the final beam selections for all 12 masonry configurations. Additionally, for a comprehensive overview of steel profile optimization, Table 4 presents the final joist profiles chosen for each dead load case and corresponding masonry configuration.

Table 4 – Optimized Steel Profiles for Joists by Masonry Configuration

Type of masonry	Thicknesses (cm)	Steel profile for normal architecture version	Steel profile for weight-reduced version
Load-bearing block	10	W10x15	W10x15
Load-bearing block	15	W8x13	W10x15
Load-bearing block	20	W10x12	W10x15
Lightened block	10	W10x12	W10x12
Lightened block	15	W10x15	W10x15
Mambon bricks	8	W10x15	W10x15

A detailed analysis of material weights was conducted for each of the 12 masonry configurations. This analysis considered the weight of various steel profiles used in beams (detailed in Table 3) and joists (detailed in Table 4). The weight of the columns was excluded as they were designed as constant-weight hollow sections with composite concrete and steel construction.

Later, meticulous attention was paid to examining the story drifts. Story drift values for each floor level were extracted from the ETABS models, considering the variations in dead load due to the specific type of masonry unit used in each design version. This analysis ensured that the story drifts remained within the allowable limits established by the NEC. The NEC specifies a maximum allowable story drift value based on the chosen reduction factor (R) and the calculated basal shear.

The drift behavior of the building structures was evaluated visually using graphs. These graphs plotted story height (Y-axis) against story drift values (X-axis). Separate graphs were created

for both the normal and weight-reduced architectural designs. Each design variant had two corresponding graphs: one for X-axis drifts and another for Y-axis drifts. This visualization approach allows for a comprehensive understanding of the lateral deformations experienced by the buildings under seismic loads in both directions, considering all the applied masonry cases.

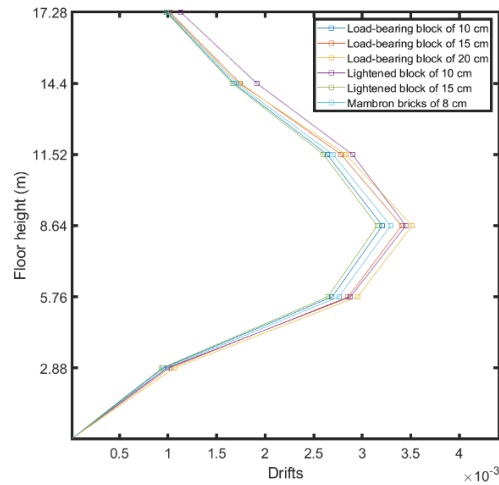


Figure 3 – Normal Architectural Designs: Story Drift vs. Floor Height (X-Axis)

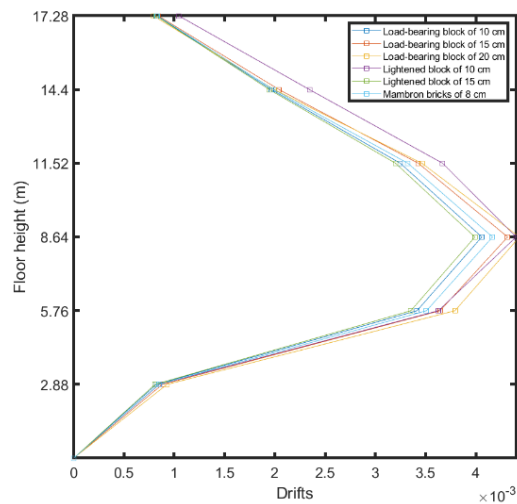


Figure 4 – Normal Architectural Designs: Story Drift vs. Floor Height (Y-Axis)

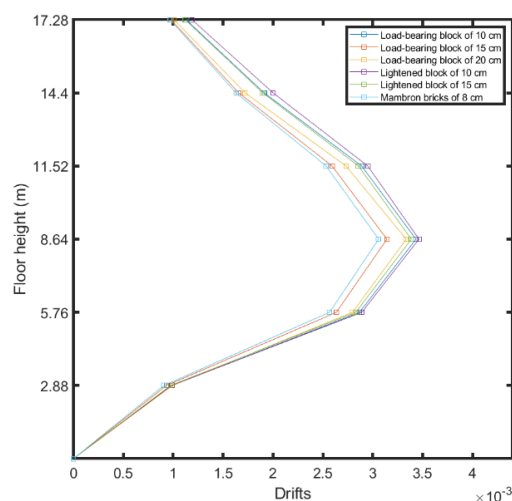


Figure 5 – Drift for Weight-Reduced version of the X axis

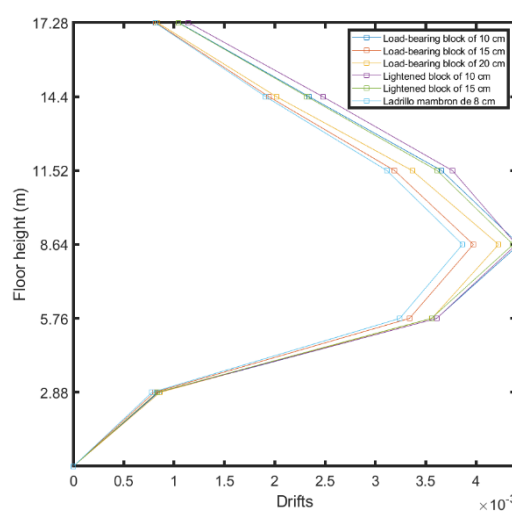


Figure 6 – Drift for Weight-Reduced version of the Y axis

The story drift analysis, presented in Figures 2, 3, 4, and 5, demonstrates satisfactory performance for both the normal architecture and weight-reduced versions of the building structures. None of the masonry configurations exceeded the maximum allowable story drift limit of 0.0044, as established by the Ecuadorian Building Code (NEC).

This finding indicates that both building versions possess adequate lateral stiffness under seismic loads to control deformations within acceptable limits in both the X-axis and Y-axis directions. The graphs also reveal a similar trend in the drift behavior along both axes, suggesting a well-balanced response of the structures to seismic excitation.

In addition to beams, joists, and columns, the analysis also incorporated the weight of building walls. By combining these weight components, the total weight of the building structure was

determined for each dead load case and masonry configuration. Table 5 summarizes these total weights, allowing for a comprehensive comparison of weight efficiency between the normal architecture version and weight-reduced design versions across all the masonry variations.

Table 5 – Weight Comparison of Building Structures (Normal Architecture Version vs. Weight-Reduced)

Type of masonry	Thicknesses (cm)	Weight for Normal Architecture version (Ton)	Weight for Weight Reduced version (Ton)
Load-bearing block	10	139.80	130.85
Load-bearing block	15	140.15	139.80
Load-bearing block	20	143.96	140.15
Lightened block	10	129.62	126.45
Lightened block	15	140.15	130.85
Mambron bricks	8	140.15	139.80

Table 5 summarizes the total weight calculations for each masonry configuration and dead load case. Analyzing the baseline version data, we observe the maximum weight of 143.96 tons for the 20 cm thick load-bearing block. This aligns with expectations as this material type has the highest dead load due to its weight. Conversely, the minimum weight of 129.62 tons occurs with the 10 cm lightweight block, again demonstrating the material weight's influence on the overall building weight.

For the weight-reduced version exhibits a similar trend, with the maximum weight reaching 140.15 tons (20 cm load-bearing block) and the minimum being 126.45 tons (10 cm lightweight block). Importantly, the weight-reduced version consistently achieves lower weights compared to the baseline architecture. This translates to a significant reduction of 3.80 tons per structure, representing an 18.21% improvement in weight efficiency for the optimized design. These findings highlight the effectiveness of the optimization strategies employed.

Weight reduction in the optimized design translates to substantial economic benefits during construction. Material costs are a critical factor in overall budgets, and a lighter design offers significant savings. To quantify this advantage, a representative material cost per kilogram was established based on market research focusing on major Ecuadorean steel producers known for their high-quality materials ((Novacero, 2024): USD 1.45/kg, (AceroCenter, 2024): USD 1.39/kg, (Dipac, 2024): USD 1.42/kg). Considering this data, a conservative estimate of USD 1.42/kg was used for the cost analysis.

Table 6 – Economic Benefits of Weight Reduction: Potential Cost Savings by Masonry Type

Type of masonry	Cost for Normal Architecture version (USD)	Cost for Weight Reduced version (USD)	Potential Cost Saving (USD)
Load-bearing block	\$198,516.0	\$185,807.0	\$12,709.0
Load-bearing block	\$199,013.0	\$198,516.0	\$497.0
Load-bearing block	\$204,423.2	\$199,013.0	\$5,410.2
Lightened block	\$184,060.4	\$179,559.0	\$4,501.4
Lightened block	\$199,013.0	\$185,807.0	\$13,206.0
Mambron bricks	\$199,013.0	\$198,516.0	\$497.0

Table 6 reveals substantial cost savings achievable through weight reduction, ranging from \$497.0 to \$13,206.0 for most masonry configurations. This translates to a significant financial advantage for the optimized design. While slight cost increases occurred in specific configurations due to potential additional support elements, the overall results overwhelmingly highlight the economic benefits of weight reduction.

To quantify this advantage, a representative material cost per kilogram was established based on market research focusing on major Ecuadorean steel producers. Using a conservative estimate of USD 1.42/kg, Table 6 reveals potential cost savings of up to \$13,206 achievable through weight reduction in various masonry configurations.

The results of this research provide valuable insights for stakeholders in Quito's construction industry. Architects and engineers can utilize these findings to develop practical design guidelines for cost-effective and seismically building practices. Future research can explore a wider range of building typologies and incorporate cost analysis to further optimize building design for weight reduction and seismic performance in earthquake-prone regions.

CONCLUSIONS

This research embarked on a comprehensive study into the potential for weight optimization in low-rise residential buildings in Quito, Ecuador, a seismically active region. Focusing on a representative five-story apartment building typology, the study analyzed the interplay between material selection, architectural design strategies, and weight reduction while ensuring compliance with structural requirements. The findings demonstrate that strategic material selection and design modifications can significantly reduce building weight without compromising seismic performance. This has the potential to improve construction efficiency and cost-effectiveness in Quito's seismic context.

The findings demonstrate that strategic material selection and design modifications can significantly reduce building weight 18.21% without compromising seismic performance according to the Ecuadorian Building Code (NEC). This has the potential to improve construction efficiency and cost-effectiveness in Quito's seismic context.

A cost analysis revealed potential cost savings ranging from \$497.0 to \$13,206.0 per building due to reduced material usage. These findings suggest that weight-efficient design can contribute to a more sustainable and resource-conscious building industry in earthquake-prone areas.

In conclusion, this research project offers a wealth of valuable insights that can be strategically harnessed to propel the development of sustainable and earthquake-resistant construction practices not only in Quito but also in countless other earthquake-prone regions around the world. By ardently promoting the adoption of weight-efficient designs, this study has taken a significant step towards the creation of a more sustainable and resource-conscious building industry in seismically active areas. This, in turn, paves the way for a future where both human safety and environmental responsibility are paramount considerations in the construction process.

REFERENCES

- AceroCenter (2024) *AceroCenter, AceroCenter*. Available at: <https://acerocenter.com.ec> (Accessed: 22 May 2024).
- Cevallos, O.A. *et al.* (2017) 'Production and Quality Levels of Construction Materials in Andean Regions: A Case Study of Chimborazo, Ecuador', *Journal of Construction in Developing Countries*, 22(1), pp. 115–136. Available at: <https://doi.org/10.21315/jcdc2017.22.1.7>.
- Dipac (2024) *DIPAC - Los mejores productos de acero, DIPAC*. Available at: <https://dipacmanta.com/> (Accessed: 22 May 2024).
- Espinosa, E.P. and Vargas, C.A.P. (2018) 'Determinación de la carga permanente correspondiente a distintos tipos de mamposterías en edificaciones de vivienda', *revistapuce* [Preprint], (106). Available at: <https://doi.org/10.26807/revpuce.v0i106.133>.
- Jones, S. (2014) *Steel production & environmental impact*. Available at: <http://www.greenspec.co.uk/building-design/steel-products-and-environmental-impact/> (Accessed: 1 April 2024).
- Macias, J. *et al.* (2017) 'Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador', *Energy and Buildings*, 151, pp. 107–120. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016>.
- Mite-Anastacio, F. *et al.* (2022) 'Structural behavior of cemented bahareque for social housing: A case study in Guayaquil City, Ecuador', *Frontiers in Built Environment*, 8. Available at: <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.922397>.
- Navas, L., Caiza, P. and Toulkeridis, T. (no date) 'AN EVALUATED COMPARISON BETWEEN THE MOLECULE AND STEEL FRAMING CONSTRUCTION SYSTEMS – IMPLICATIONS FOR THE SEISMIC VULNERABLE ECUADOR'.

Novacero (2024) *Inicio - Novacero*. Available at: <https://www.novacero.com/> (Accessed: 22 May 2024).

Stasiak-Betlejewska, R. and Potkány, M. (2015) ‘Construction Costs Analysis and its Importance to the Economy’, *Procedia Economics and Finance*, 34, pp. 35–42. Available at: [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01598-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01598-1).

Suarez, G. (2003) *Seismicity, fault plane solutions, depth of faulting, and active tectonics of the Andes of Peru, Ecuador, and southern Colombia - Suárez - 1983 - Journal of Geophysical Research: Solid Earth - Wiley Online Library*. Available at: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JB088iB12p10403> (Accessed: 30 March 2024).

Tulebekova, S. *et al.* (2022) ‘Modeling stiffness of connections and non-structural elements for dynamic response of taller glulam timber frame buildings’, *Engineering Structures*, 261, p. 114209. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114209>.