

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Arquitectura e Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Mención en Diseño y Materiales

Selección de material alternativo híbrido o no convencional para la construcción,
utilizando métodos multicriterio y simulación de esfuerzos-deformación para optimizar
el material.

Bryan Iván Cueva Vaca

Nota del Autor

Bryan Cueva, Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Universidad Internacional SEK.

Director: PhD. Javier Martínez.

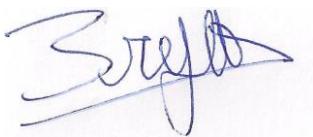
Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

bcueva.mec@uisek.edu.ec

Declaración Juramentada

Yo, Bryan Iván Cueva Vaca, con cédula de identidad 1723203988, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente. El presente trabajo pertenece al programa de Ingeniería Mecánica con mención en Diseño y Materiales.



Bryan Ivan Cueva Vaca.

CI: 1723203988

Índice de Contenido

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
INTRODUCCIÓN	11
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
JUSTIFICACIÓN.....	17
OBJETIVO GENERAL	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
ESTADO DEL ARTE	19
IMPACTO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA DE PLÁSTICOS Y CEMENTO	19
ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACION	21
COLUMNA ESTRUCTURAL	28
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	29
Tipos de defectos y fallos en ensayos de resistencia a la compresión.....	30
Ensayo de un material.....	31
Ensayo destructivo.....	31
ANÁLISIS FEA (FINITE ELEMENTS ANALYSIS)	31
NORMAS	32
Normativa NEC	32
SELECCIÓN DE MATERIALES Y MÉTODOS MULTICRITERIO	34
Software de selección CES Edupack Granta Design.....	39
Índices de rendimiento.....	44
MÉTODOS DE SELECCIÓN MULTICRITERIO (MCDM)	45
Método VIKOR	46
Método TOPSIS	47
Método COPRAS	47
Método DOMINIC	47
Coeficiente de SPEARMAN	48
MÉTODO.....	50
FUNCIONAMIENTO Y FALLA DE UNA COLUMNA ESTRUCTURAL	50
CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN APLICADO A UNA COLUMNA ESTRUCTURAL.....	51
DETERMINACIÓN DE GEOMETRÍA Y PRECIO DE COLUMNA DE HORMIGÓN ARMADO.....	52
CRITERIOS DE SELECCIÓN	56
SELECCIÓN DE MATERIALES CES EDUPACK NIVEL 3 (ECO DESIGN).....	61
SELECCIÓN DE MATERIALES CES EDUPACK NIVEL 2 (ARQUITECTURA)	68
PONDERACIÓN DE PESOS.....	72
Método de Entropía	72
Método de desviación estándar.....	74
Método de variación estadística	75
MÉTODOS MULTICRITERIO MCDM	77
Método VIKOR	77
Método TOPSIS	79
Método DOMINIC	80
Método COPRAS	82
COEFICIENTE DE SPEARMAN.....	84
PROPUESTA DE VIVIENDA DE UNA PLANTA	85

DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN	87
Determinación de cargas muertas y vivas	87
Determinación de zonas y curvas de peligro sísmico.....	89
Determinación de configuraciones estructurales y pórticos resistentes a momento	91
Simulación en software Cype CAD.....	92
Modelado CAD	97
Simulación de esfuerzos-deformación en Inventor	99
ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	106
RESULTADOS OBTENIDOS DE CES EDUPACK	108
RESULTADOS POR INDICES DE RENDIMIENTO	110
DESARROLLO DE MÉTODO DE PONDERACIÓN DE PESOS	111
Método de entropía.....	111
Método de desviación estándar.....	114
Método de variación estadística	114
Comparación y selección de valores de métodos de ponderación de pesos	116
RESULTADOS MÉTODO DE PONDERACIÓN PESOS	116
APLICACIÓN DE MÉTODOS MULTICRITERIO MCDM.....	118
Método VIKOR	118
Resultados Método VIKOR	122
Método TOPSIS	123
Resultado método TOPSIS	125
Método DOMINIC	126
Resultado método DOMINIC.....	130
Método COPRAS	131
Resultado método COPRAS.....	135
COMPARACIÓN DE RESULTADOS MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM).....	136
RESULTADOS DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN	138
RESULTADOS SIMULACIÓN MECÁNICA	140
RESULTADOS DE FACTOR DE SEGURIDAD.....	140
RESULTADOS DE ESFUERZO DEFORMACIÓN	144
RESULTADO DE DESPLAZAMIENTO	147
COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE SIMULACIÓN	150
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	157
DISCUSIÓN DE LA PROPUESTA DEL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN	163
CONCLUSIONES	165
RECOMENDACIONES	168
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169

Índice de Tablas

Tabla 1. Requerimientos de diseño para vigas de piso.....	42
Tabla 2. Criterios para el diseño.....	58
Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas del hormigón (portland)	61
Tabla 4. Propiedades de los materiales candidatos.	70
Tabla 5. Carga muerta: peso de los materiales	88
Tabla 6. Valores de cargas (uniformes y/o concentradas) acorde con la ocupación o uso	88
Tabla 7. Valores de factor Z en funcione de la zona sísmica adoptada.....	90
Tabla 8. Tipo de uso, destino e importancia de la estructura	90
Tabla 9. Requisitos mínimos en función del número de pisos de la vivienda.....	92
Tabla 10. Características de la simulación	92
Tabla 11. Géneros y características de bambúes.	98
Tabla 12. Características del mallado.....	100
Tabla 13. Configuración de la convergencia	100
Tabla 14. Características mecánicas del bambú y hormigón.....	100
Tabla 15. Condiciones de carga para cada elemento estructural	105
Tabla 16. Propiedades de materiales candidatos al analisis de ponderación de pesos y MCDM.	107
Tabla 17. Solución por índices de rendimiento	110
Tabla 18. Resultados de Cálculo de Entropía (e) y Grado de Divergencia (d)	113
Tabla 19. Resultado de pesos obtenidos del método de entropía.	114
Tabla 20. Resultados obtenidos de la Desviación Estándar.	114
Tabla 21. Pesos obtenidos mediante el método de desviación estándar.....	114
Tabla 22. Matriz de decisión normalizada del método de Variación Estadística. `	115
Tabla 23. Resultados del método de Variación Estadística.....	115
Tabla 24. Obtención de pesos mediante el método de Variación Estadística.	116
Tabla 25. Datos agrupados de Valores de Ponderación de Pesos.	116
Tabla 26. Pesos para utilizar en MCDM (Variación Estadística)	116
Tabla 27. Resultados obtenidos de ponderaciones de pesos.	117
Tabla 28. Matriz de decisión método VIKOR.....	118
Tabla 29. Datos ordenados de la matriz normalizada Rij.....	119
Tabla 30. Matriz estandarizada de pesos VIKOR.	120
Tabla 31. Resultados intermedios VIKOR.	121
Tabla 32. Ranking VIKOR.....	122
Tabla 33. Resultado método VIKOR	122
Tabla 34. Matriz de soluciones ideales y negativas TOPSIS	123
Tabla 35. Distancias intermedias de resultados positivos y negativos TOPSIS.....	124
Tabla 36. Ranking método TOPSIS	125
Tabla 37. Resultados método TOPSIS	125
Tabla 38. Matriz de decisión método DOMINIC.....	126
Tabla 39. Matriz de ponderación DOMINIC	127
Tabla 40. Matriz de ponderación DOMINIC	127
Tabla 41. Matriz de ponderación normalizada DOMINIC.....	128
Tabla 42. Resultados intermedios DOMINIC	129
Tabla 43. Ranking método DOMINIC	129
Tabla 44. Resultados método DOMINIC	130
Tabla 45. Matriz de decisión método COPRAS.....	131
Tabla 46. Matriz normalizada COPRAS	132

Tabla 47. Matriz estandarizada de pesos V_{ij}	132
Tabla 48. Pesos positivos y negativos normalizados COPRAS.....	133
Tabla 49. Prioridades relativas COPRAS.....	134
Tabla 50. Ranking Método COPRAS.....	134
Tabla 51. Resultados método COPRAS.....	135
Tabla 52. Comparación de Ranking MCDM.....	137
Tabla 53. Correlación de Spearman en resultados MCDM.....	138
Tabla 54. Grado de relación según coeficiente de correlación.....	138
Tabla 55. Factor de seguridad de cada elemento.....	141
Tabla 56. Resultados de simulación Von Misses.....	144
Tabla 57. Resultado de desplazamiento en simulación.....	147
Tabla 58. Comparativa de costos, reciclabilidad y biodegradabilidad del Bambú vs Hormigón.....	154
Tabla 59. Propiedades físicas y mecánicas del bambú vs hormigón.....	155
Tabla 60. Comparación de FS bambú vs hormigón.....	156
Tabla 61. Resistencia a la deformación del bambú vs hormigón.....	156
Tabla 62. Desplazamiento del bambú vs hormigón.....	156
Tabla 63. Características técnicas columnas Brickarp.....	157
Tabla 64. Características técnicas bambú.....	157
Tabla 65. Resultados de prueba de compresión axial bambú tratado como refuerzo al concreto.....	159
Tabla 66. Resultados de compresión axial a columna de bambú en simulación.....	159
Tabla 67. Materiales estructurales para edificios (ASHBY).....	161
Tabla 68. Materiales para la construcción sostenibles (AUTOR).....	162

Índice de Figuras

Figura 1. Ensamble de dos mitades de bambú conectados por su cara convexa.	23
Figura 2. Paneles prefabricados a base de polines de bambú ensamblados.	24
Figura 3. Sistema constructivo de bloques y columnas de plástico extruido.	25
Figura 4. Tipos de secciones en columnas.	29
Figura 5. Tipos de fallos y defectos en ensayos de compresión.	30
Figura 6. Base de datos disponible en CES Edupack.	40
Figura 7. Selección de materiales para estructura planteada por Ashby.	41
Figura 8. Selección de materiales económicos y rígidos para los marcos estructurales de edificios.	43
Figura 9. Selección de materiales económicos y resistentes para estructuras.	43
Figura 10. Grafica de comparación de Métodos Multicriterio (MCDM).	48
Figura 11. Cambios de esbeltez en columnas por cambios de la arquitectura de la ciudad	51
Figura 12. Dimensiones de columna perfil rectangular.	53
Figura 13. Criterios de encofrado y desencofrante.	54
Figura 14. Criterios para hormigón.	54
Figura 15. Criterios para el acero en columna de hormigón armado.	55
Figura 16. Separadores de plástico para armadura.	55
Figura 17. Rubros para columna de hormigón armado.	56
Figura 18. Índices de rendimiento, minimizar coste.	57
Figura 19. Índice de rendimiento, impacto ambiental mínimo.	57
Figura 20. Esquema de esfuerzo cortante en columna.	60
Figura 21. selección de base de datos para el proyecto.	62
Figura 22. Registros de materiales para la selección.	63
Figura 23. Parámetros de precio-esfuerzo de compresión.	64
Figura 24. Materiales biodegradables vs reciclables.	64
Figura 25. Rigidez limitada minimizando la huella de CO2	65
Figura 26. Rigidez limitada minimizando costos	65
Figura 27. Diseño de resistencia limitada con costo y huella de CO2 minimizada.	66
Figura 28. Eliminación de materiales por debajo de los índices más altos en comparación al concreto.	66
Figura 29. Materiales biodegradables.	67
Figura 30. Materiales reciclables.	67
Figura 31. Analisis nivel 2, materiales para superestructuras.	68
Figura 32. Secuencia metodológica.	85
Figura 33. Distribución de la vivienda de una sola planta.	86
Figura 34. Distribución de columnas de la vivienda	86
Figura 35. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor de factor Z.	89
Figura 36. Curvas de peligro sísmico, Nueva Loja	91
Figura 37. Factores sísmicos acorde a la norma NEC-SE-DS 2015	93
Figura 38. Datos generales para columnas de hormigón armado.	94
Figura 39. Representación de losa de la vivienda	95
Figura 40. Conjunto de columnas de igual carga y esfuerzos	96
Figura 41. Esfuerzos presentes en columna 1-A	96
Figura 42. Esfuerzos presentes en columna 2-A	96
Figura 43. Esfuerzos presentes en columna 1-B.	97
Figura 44. Plano de columna de hormigón.	98
Figura 45. Geometría de Bambú	99

Figura 46. Parámetros de edición de materiales	101
Figura 47. Idealizaciones del elemento	102
Figura 48. Aplicación de restricciones a columna de concreto	102
Figura 49. Aplicación de cargas a columna de hormigón	103
Figura 50. Configuración y convergencia de mallado en conjunto	104
Figura 51. Resultado de simulación	104
Figura 52. Resultado grafico de materiales nivel 3 de CES Edupack con la aplicación de índices de rendimiento.....	108
Figura 53. Resultado grafico de materiales nivel 2 de CES Edupack con la aplicación de índices de rendimiento.....	109
Figura 54. Diagrama de Pareto FOM1	111
Figura 55. Diagrama de Pareto FOM2	111
Figura 56. Comparación de métodos de ponderación	117
Figura 57. Ranking método VIKOR	123
Figura 58. Ranking método TOPSIS	126
Figura 59. Ranking método DOMINIC.....	130
Figura 60. Ranking método COPRAS.....	135
Figura 61. Comparación de resultados MCDM	137
Figura 62. Analisis de correlación de SPEARMAN	139
Figura 63. Tipos de correlaciones.	139
Figura 64. Factor de seguridad de bambú en simulación	142
Figura 65. Factor de seguridad de Hormigón en simulación.....	143
Figura 66. Esfuerzo deformación del bambú en simulación	145
Figura 67. Esfuerzo deformación del hormigón en simulación.....	146
Figura 68. Desplazamiento del bambú en simulación.....	148
Figura 69. Desplazamiento del hormigón en simulación	149
Figura 70. Comparación F.S. Bambú y Hormigón.....	150
Figura 71. Comparación Desplazamiento entre Bambú y Hormigón	151
Figura 72. Comparación Von Misses entre bambú y hormigón.....	151
Figura 73 Comparación de resultados F.S. Hormigón-Bambú	152
Figura 74. Comparación de resultados Desplazamiento Hormigón-Bambú	153
Figura 75. Comparación de resultados Von Misses Bambú-Hormigón.....	153
Figura 76. Grafica comparativa de propiedades del bambú vs Columna Brickarp.....	158
Figura 77. Grafica comparativa de deformación del bambú sometida a cargas de compresión axial.....	160
Figura 78. selección de material optimo mediante MCDM	163

Resumen

El alto crecimiento de la industria de la construcción y la alta contaminación que genera la producción de materiales convencionales como el hormigón. Ha despertado el interés en investigadores para el desarrollo de selección de materiales mediante la aplicación de métodos multicriterio e índices de rendimiento en términos económicos, sociales y ambientales para contrarrestar el impacto ambiental que generan.

La presente investigación se basa en la búsqueda de nuevos materiales apoyados en la base de datos del software CES Edupack mediante el uso de índices de rendimiento y tres criterios principales (Económico, Social y Ambiental). Se aplicará un análisis por medio de métodos multicriterio (TOPSIS, COPRAS, DOMINIC y VIKOR) para obtener un material óptimo para su uso en columnas de hormigón, aplicadas a una propuesta de Vivienda de Interés Social, siendo el Bambú la opción ideal a considerarse. El uso de bambú como material alternativo al hormigón presenta características biodegradables y reciclables. Se obtiene una baja huella de CO₂ en su producción primaria de 0.004 Kg/Kg para el bambú y 0.24 Kg/Kg para el hormigón.

Mediante la aplicación de cargas de 0.38, 3.40 y 4.14 toneladas en simulación. Se obtienen factores de seguridad que garantizan su aplicación para el bambú de 15, 4 y 3.28 y para el hormigón de 2.65, 0.52 y 0.471 respectivamente. Esto comprueba que el material tendera a fallar por concentraciones de esfuerzo en los puntos sobresalientes del elemento de hormigón causado por deficiencia del material.

La utilización del bambú como elemento estructural en infraestructura puede ser una alternativa viable que cumple con los requisitos sostenibles al ser un material de bajo costo, biodegradable y reciclable para ser reemplazado al uso de concreto.

Palabras claves: hormigón, diseño sostenible, construcción.

ABSTRACT

The high growth of the construction industry and the pollution that generates the conventional material production, has awakened the interest of researches to develop new technologies and to make investigations concerning the selection of alternate materials to offset the environmental impact that is generated.

This investigation is based on the search for new materials supported on the CES Edupack software database using performance indexes and three major criteria (Economical, Social & Environmental). An analysis by the multi-criteria methods (TOPSIS, COPRAS, DOMINIC, VIKOR) will be applied to obtain an optimal material for its use at concrete columns, all this applied to a social interest-housing proposal, being Bamboo the ideal option to consider.

The use of Bamboo as an alternate material to concrete presented biodegradable and recyclable characteristics. It leaves a low CO₂ footprint of 0.004Kg/Kg on its primary production compared to 0.24 Kg/Kg for concrete.

Through the application of charges of 0.38, 3.40 and 4.14 tones at simulation, safety factors are obtained that warrantee its application of 15.4 and 3.28 for Bamboo and 2.65, 0.52 and 0,471 for concrete. This proves that the material will tend to fail due to stress concentrations at the outstanding points of the concrete element caused by material deficiency.

The use of Bamboo as a structural element at infrastructure can be a reliable alternative that meets with the sustainable requirements because it is a low-cost, biodegradable, and recyclable material to replace the use of concrete.

Key words: Concrete, design, sustainable, construction.

Introducción

La rápida industrialización y urbanización a nivel mundial, conlleva el crecimiento acelerado en la industria de la construcción, lo que contribuye significativamente a la contaminación ambiental. La contaminación general producida por procesos convencionales de construcción, es un tema actual de preocupación entre investigadores, planteando hoy en día que se incorporen diseños de infraestructura sostenible. (Chen et al., 2019)

La aparición del concepto de sostenibilidad ha sido motivada por catástrofes naturales, contaminación ambiental, agotamiento de recursos naturales, etc. Implica un concepto que integra principalmente aspectos económicos, sociales y ambientales. Estos tres aspectos a menudo se los denomina como los tres pilares fundamentales de sustentabilidad. A pesar de que existen varias definiciones de desarrollo sostenible una de las más citadas es “para lograr la sostenibilidad, la ingeniería sostenible se propone como una solución potencial que implica la aplicación de diferentes métodos” (Lozano, 2008). Como ejemplo pueden incluir la construcción de instalaciones realizadas de materiales que proporcionan eficiencia energética, encontrando formas de energía que no liberen grandes cantidades de CO₂ a la atmósfera, búsqueda de nuevos materiales que logren mitigar el impacto generado por la explotación de materiales convencionales.

La ingeniería es la aplicación de principios científicos y matemáticos para objetivos prácticos, tales como, fabricación, diseño y operación de productos, teniendo en cuenta las limitaciones en cuanto a los tres pilares fundamentales de sustentabilidad. El enfoque de la teoría de la toma de decisiones se ha convertido en un medio importante para proporcionar soluciones en tiempo real a problemas de incertidumbre, especialmente para este tipo de aplicaciones. En las últimas décadas numerosos métodos multicriterio han cobrado fuerza en los últimos años para la toma de decisiones

adecuadas en cuanto a la selección de materiales, destacando el método COPRAS (Complex Proportional Assessment), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) y VIKOR (Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, término Serbio) donde su aplicación en varios estudios de selección de materiales alternativos en términos de desarrollo sostenible, como lo menciona el importante estudio de (Mousavi-Nasab & Sotoudeh-Anvari, 2017) han tenido los mejores resultados de selección de materiales óptimos para su aplicación.

La construcción es un área que interactúa enormemente con el entorno natural. Un gran porcentaje de las materias primas se obtienen de la tierra, y en su tratamiento, procesamiento y en la construcción de edificaciones la contaminación ambiental es inevitable. Para poder evitar en cierto grado este tipo de contaminación, Akadiri et al., (2013) sugirieron una serie de factores para la evaluación de selección de materiales sostenibles. Los criterios de decisión deben identificarse acorde con las necesidades de los tres pilares definidos concluyen que el análisis por métodos multicriterio facilita la toma de decisiones que, debido a su alta complejidad de tareas desafiantes y multifacéticas, estos métodos buscan puntos de compromiso entre factores de decisión incompatible para llegar a cumplir con los objetivos planteados. (San-José Lombera & Cuadrado Rojo, 2010) en su publicación: "Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability". Proponen la utilización la metodología Española MIVES (Modelo Integrado de Valor para la Evaluación Sostenible) para definir los criterios para la sostenibilidad de los edificios industriales y seleccionar la solución óptima con respecto a ellos. Obtuvieron que la aplicación de MIVES en edificaciones es una solución óptima que acompañada con la metodología de la teoría de utilidad con atributos múltiples (MAUT) varios atributos que facilitan la valoración de indicadores y ponderaciones en subniveles que sean efectivas al momento

de evaluar el impacto ambiental en todas las etapas a lo largo del ciclo de vida de un edificio. Un estudio similar fue presentado por (Del Caño et al., 2012) en su publicación: “Uncertainty Analysis in the sustainable design of concrete structures: A probabilistic method”. Utilizaron la misma metodología MIVES en combinación con la simulación Monte Carlo para evaluar la sostenibilidad de las estructuras de hormigón, sin embargo determinaron que el modelo del código Estructural del Hormigón Español puede causar problemas en términos de gestiones del proyecto en cuanto a sostenibilidad estructural. Por lo que concluyeron que un método no solo debe evaluar el índice de sostenibilidad, sino también el grado de incertidumbre o correlación. La misma metodología también fue utilizada por (de la Fuente et al., 2017) en su publicación: “Sustainability based-approach to determine the concrete type and reinforcement configuration of TBM tunnels linings”. Concluyeron que el hormigón reforzado con fibra es una alternativa adecuada al hormigón reforzado tradicional con acero utilizado en la fabricación de segmentos prefabricados utilizados para revestir túneles. El refuerzo con fibras estructurales confiere ventajas técnicas y económicas por medio de la utilización de la metodología MIVES. Otra propuesta la hace (Pons & De La Fuente, 2013) en su publicación: “Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns” concluyeron que la aplicación de la metodología MIVES como método multicriterio en columnas de hormigón armado in situ en edificaciones satisface con los tres pilares fundamentales de sostenibilidad tomando en cuenta factores de diseño como variables de resistencia a la compresión del concreto, geometría de sección transversal. Otra propuesta la realiza Andrés Mafla, en su publicación: “Uso de la Cascarilla de Arroz como Material Alternativo en la Construcción” (2009, p.2). concluye que la cascarilla de arroz como material puzolánico en adición al concreto favorece la formación de más fase. Los resultados al adicionar

ceniza de arroz influyeron sobre la resistencia a la compresión y propiedades físico-mecánicas. La utilización del bambú como elemento estructural lo plantea Soria-López, F. J., & Guerrero-Baca, L. F. (2019) en su publicación: “Polín de bambú ensamblado: diseño alternativo para la construcción de estructuras ligeras”. Concluye que la factibilidad de su sistema constructivo radica en las excelentes propiedades del bambú para su uso estructural en propiedades mecánicas. De igual manera satisface con los tres principales pilares de sustentabilidad. Otro estudio lo plantea (Agarwal et al., 2014) en su publicación: “Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns” concluye que la viabilidad del uso del bambú como refuerzo al concreto aumenta la resistencia a la compresión, tracción y carga transversal a las probetas ensayadas resultando que las columnas de refuerzo con bambú tratado proporciona casi la misma resistencia que la columna con refuerzo de acero, de igual manera, la utilización de Sikadur 32 como aditivo para la adhesión de sus componentes es el más óptimo. Sugieren que el bambú tiene el potencial de sustituir al acero como refuerzo. La utilización de plástico reciclado en fabricación de columnas de plástico extruido como lo detalla Castillo Moncayo, D. C. (2018) en su publicación: “Análisis de la Selección de material mediante MCDM aplicado a la Construcción implementación de ladrillos fabricados a partir de plástico reciclado como material de construcción”. Concluye que el reciclaje de botellas PET para la elaboración de columnas de plástico Brickarp es una solución viable para la construcción de viviendas de interés social. De igual manera satisface con los tres pilares de sustentabilidad. Siendo una idea ideal para limpiar grandes toneladas de plástico existente en el medio ambiente.

Dicho lo anterior, la importancia de la selección de materiales en diferentes proyectos es de suma importancia por lo que el software CES Edupack, proporciona una base de datos integral de información sobre materiales y procesos divididas en tres

niveles de selección de manera exhaustiva sobre propiedades técnicas, económicas y medioambientales. La importancia de este software es facilitar el proceso de selección de materiales dentro de un mundo diverso de materiales existentes en el entorno, donde incorpora una metodología estructurada que permite al usuario comparar diversos materiales y procesos.

El problema ambiental y económico, es que principalmente en el Ecuador, no se desarrollan propuestas de diseño sostenible para la construcción de viviendas y edificaciones. De este modo para resolver los dos problemas, es necesario investigar acerca de materiales sustentables que cumplan con las características de diseño, a fin de sugerir un material óptimo disponible en el mercado.

Es decir, el aspecto medular en la presente investigación es revisar exhaustivamente las publicaciones de los autores mencionados con anterioridad para sugerir un material idóneo para la construcción de Viviendas de Interés Social aplicada a la comunidad de Limoncocha mediante la propuesta de una vivienda de una planta, enfocado especialmente a elementos estructurales como son las columnas, donde se aplica criterios de sostenibilidad que ayuden a mitigar el impacto ambiental generado por el desarrollo de materiales convencionales de construcción, se aplica métodos de selección multicriterio MCDM y selección de materiales en base al software CES Edupack, mismo que ayudo a seleccionar el mejor material de una lista de 10 materiales candidatos; los beneficios de este trabajo investigativo se verán reflejados en motivar el desarrollo de nuevas tecnologías de diseño sostenible en base a la revisión de investigaciones previas para contrarrestar el impacto ambiental que genera este tipo de industrias, con materiales alternos que cumplan con similares características físicas y mecánicas para su aplicación.

Planteamiento del Problema

La importancia de selección de materiales sostenibles se basa principalmente en el hecho de que una inadecuada selección, pueda influir negativamente en la comodidad, salud, seguridad y el costo de ciclo de vida del edificio (Ortiz et al., 2009). En la mayoría de los estudios con respecto a la selección de materiales alternativos mencionados con anterioridad, se plantea la utilización de métodos de toma de decisiones multicriterio para tener una jerarquización de los distintos criterios a evaluar, basados principalmente en el ciclo de vida, consumo de energía y huella de CO₂, en otras palabras, ver el desempeño ambiental asociado a la extracción, fabricación, uso, reparación y mantenimiento de materias primas, eliminación, biodegradabilidad y reciclaje como lo menciona la presente investigación. Aportando a investigaciones la utilización del Software CES Edupack para facilitar el proceso de selección de materiales mediante índices de rendimiento que satisfagan con los tres pilares de la sustentabilidad. De igual manera se busca validar la

Sin embargo, el desarrollo metodológico en la toma decisiones de materiales de construcción, fracasan en gran medida al momento de valorar un desempeño económico, social y técnico en conjunto; de igual manera, los procesos inferiores establecidos a la toma de decisiones en la selección de materiales sostenibles son, en muchos sentidos, costosos y dependientes de aplicaciones limitadas y específicas en su utilización. Por lo que, en gran medida para romper ese tipo de limitaciones en la utilización de estos materiales, conlleva al desarrollo e investigación de una metodología potencial y novedosa para la implementación de nuevos materiales que ayuden a mitigar el impacto ambiental generado por la mala administración de recursos naturales. (Chen et al., 2019)

Justificación

En un proceso de toma de decisiones, como es seleccionar materiales en términos de sostenibilidad, radica en que es un proceso complicado de toma de decisiones múltiples, enfocados principalmente en la aplicación que tendrá el material y el cumplimiento de factores técnicos que satisfagan la seguridad y viabilidad del material. Todo esto sobrelleva a cumplir objetivamente varios criterios de evaluación que generalmente entran en conflicto entre sí.

Dicho lo anterior, el presente trabajo realiza un estudio de los métodos multicriterio para la selección de un material alternativo al uso de hormigón en columnas estructurales, enfocado a este elemento principalmente por ser un componente de suma importancia para el soporte de la estructura; este elemento se encarga especialmente en soportar distintas cargas de compresión y flexión para transmitir las a la cimentación, garantizando la seguridad de sus ocupantes, por lo que su construcción, diseño y selección de materiales requiere de un especial cuidado, esto con la finalidad de que pueda ser aplicado en el medio ecuatoriano con la aplicación de normas de construcción vigentes en el país.

La investigación se centrará especialmente en la selección de materiales híbridos, polímeros, compuestos y naturales que sean biodegradables y/o reciclables evaluando su desempeño en la huella de CO₂. Se plantea especialmente la aplicación del material resultante a una propuesta de vivienda de interés social (VIS) aplicable a la comunidad de Limoncocha localizada en la provincia de Sucumbíos región oriente.

Objetivo general

Seleccionar un material óptimo para el reemplazo del uso de hormigón en columnas estructurales en infraestructuras, utilizando métodos multicriterio y simulación esfuerzos-deformación para garantizar la fiabilidad del material.

Objetivos específicos

1. Evaluar distintos materiales mediante el método de análisis de decisión de criterios múltiples MCDM entre diez alternativas de materiales para el reemplazo en columnas de hormigón.
2. Seleccionar la alternativa preponderante del material mediante 4 MCDM y ocho variables para garantizar un resultado óptimo en la toma de decisiones.
3. Evaluar posibles materiales para el reemplazo de hormigón mediante la aplicación de índices de rendimiento en términos de sostenibilidad mediante el software CES Edupack.
4. Evaluar las características físicas y mecánicas del material seleccionado a través de simulación computarizada para garantizar la fiabilidad del material.
5. Proponer una vivienda de una sola planta con el fin de conocer las diferentes cargas aplicadas a cada una de las columnas para realizar una comparativa del material base y material preponderante.

Estado del arte

Impacto ambiental de la industria de plásticos y cemento

En la actualidad existen varios estudios que dan a conocer las consecuencias del impacto ambiental que generan los desechos indiscriminados ocasionados por los seres humanos. Esto ha generado daños a los diversos ecosistemas al punto de llegar a contaminar los océanos a través de las redes de saneamiento de las grandes ciudades, lo que genera el deterioro de los ecosistemas fluviales aledaños a las ciudades que son de suma importancia. Por lo general el daño más significativo en su gran mayoría es generado por los plásticos, tanto que ha generado a ser comparado con otros materiales para establecer diferencias entre otros polímeros, sin embargo, es importante señalar que no existe un método universal que permita determinar el impacto ambiental que generan los productos ya que es un concepto muy amplio que ocasiona varias interpretaciones por varios factores. Una de las metodologías que ha ido creciendo en los últimos años es la metodología de evaluación en el análisis ciclo de vida. El análisis ciclo vida por su acrónimo (ACV), es una herramienta que permite determinar el impacto ambiental que genera un proceso o producto en el medio ambiente, recursos naturales y energía, emisiones y residuos producidos. A diferencia de los análisis tradicionales, este método usa un enfoque cradle-to-grave (de la cuna a la tumba), tomando en cuenta los efectos generados desde la extracción y explotación de la materia prima provenientes de la naturaleza hasta la reincorporación de los materiales al ambiente. De esta manera se genera una visión más amplia e integral de los impactos que se generan en un producto y proceso. (Vazquez et al., 2016)

Por otro lado, varios estudios a nivel mundial han demostrado que la industria de la construcción es uno de los contaminadores más grandes del planeta, por lo que se deben implementar nuevos estándares ambientales para poder disminuir su impacto.

Esto se debe a que el crecimiento de viviendas en las zonas rurales y urbanas se han ido ampliando, ocasionando la disminución de bosques y áreas protegidas. Este aumento en la industria inmobiliaria no es ecológicamente sostenible ya que usan materiales contaminantes, que a su vez son nocivos para el ambiente, como la gran demanda de combustibles fósiles para el uso de la maquinaria que se utiliza por este tipo de industria. (Murillo, CZ, Hernández, JRH y Vázquez, ML. 2019, julio).

El no aprovechar de una manera adecuada los residuos de concreto producido por el hombre, implica el uso de mayor combustible, comercialización y distribución; de la misma manera es importante mencionar que en temas de extracción de materias primas, impacto ambiental, erosión de suelo y consumo de grandes cantidades de agua, es un tema importante para justificar y validar su reciclaje. La búsqueda de nuevos materiales que puedan aminorar la explotación del mismo, o reducir la cantidad de cemento y arenas que contiene. (Valderrama, 2002)

Tomando en cuenta el impacto que genera la explotación tanto de plástico como la explotación y producción de cemento, es necesario buscar alternativas que sean viables para de esta manera promover el reciclaje de estos desechos para aminorar la contaminación que generan. Cabe mencionar que de igual manera los edificios construidos a partir de cemento, al pasar los años estos pueden llegar al fin de su vida útil, ocasionando demoliciones el cual los desechos por lo general son utilizados para el relleno de quebradas o simplemente se los desecha. Se necesita buscar soluciones a este problema que por lo que vemos visualmente en los ecosistemas no ha sido suficiente, además de que por el avance tecnológico se necesita que un producto o elemento se biodegrade por sí misma para poder limpiar los hábitats.

Antecedentes de la investigación

El incremento del uso del concreto en la fabricación de hormigones y morteros en obras civiles, a conllevado a la investigación en la respuesta de ¿como reducir su implementación en la construcción? Al ser un material que demanda altos recursos energéticos, explotación de recursos naturales y la utilización de grandes cantidades de agua en obra. Por otro lado la construcción, además de ser indispensable para el desarrollo de la sociedad, es uno de los principales responsables en cuanto al mal uso de recursos naturales. En la sociedad actual es de suma importancia plantear la construcción sustentable o sostenible, enfocada principalmente al punto de vista económico, ecológico y sociocultural. El objetivo de una vivienda sostenible es ofrecer mejoras en aspectos relacionados con las emisiones de dióxido de carbono, el uso de agua, reciclabilidad y biodegradabilidad de los materiales usados después de llegar a su fin de vida útil.

Varios estudios plantean el aprovechamiento de residuos agroindustriales y la contribución que podrían tener al desarrollo sostenible a nivel mundial. Los residuos agroindustriales están siendo motivo de diversos estudios, debido a que gran parte de sus componentes pueden ser utilizados como materia prima en la elaboración de nuevos productos con un valor agregado, prevaleciendo actualmente desde el punto de vista de generación de bioenergéticos, tomando como prioridad la reducción del impacto ambiental que ocasionan. (Mejías-Brizuela et al., 2016)

Uno de ellos como lo plantea Andrés Mafla, en su publicación de *Uso de la Cascarrilla de Arroz como Material Alternativo en la Construcción* (2009, p.2), plantea que dentro de los cementos comúnmente usados en la industria de la construcción se destaca el cemento Portland, el cual es obtenido mediante la molienda de clinker¹,

¹ Se forma tras calcinar caliza y arcilla a una temperatura que está entre 1350 y 1450 °C. producto del horno que se muele para fabricar cemento Portland.

producto resultante del tratamiento termico a temperaturas cercanas del fundido parcial de las materias primas (arcillas y calizas). Contienen varios componentes de oxidos en pequeñas cantidades, destacandose de las principales fases que conforma el clinker son el silicato tricalcico (C_3S) y el silicato dicalcico (C_2S). Estos componentes son los mas importantes dentro de la matriz de cemento portland siendo el ultimo, un componente importante dentro de su investigacion donde menciona que con el fin de abaratar costos en la produccion de cementos se ha venido utilizando desechos agriculas y constructivos que presentan propiedades puzolanicas. Los materiales puzolanicos son materiales siliceos y/o aluminosos que no poseen un alto poder de cementacion pero al reaccionar quimicamente con otros compuestos. Pueden presentar propiedades cementantes donde la cascarilla de arroz vendria a ser un material puzolanico donde al adicionar la ceniza de arroz, favorece la formacion de mas fase. Los resultados obtenidos mediante el estudio al adicionar silicato dicalcico obtenido de la cascarilla de arroz al cemento portland tipo I, influyen sobre la reistencia a la compresion y propiedades fisico mecanicas el cual aumentan notablemente en el concreto fabricado con este tipo de mezcla. La cascarilla de arroz es una alternativa viable en el ambito de la construccion de viviendas de bajo costo, esto lo justifica que al ser la cascarilla de arroz un desecho agroindustrial se lo puede conseguir de una manera facil para implementarlo como aditivo para la elaboracion de hormigon. (Mafla, 2009)

Como segundo aporte La propuesta actual de la utilizacion del bambu como material alternativo al uso de hormigon y aplicación en la construccion de Viviendas de Interes Social. Es una solucion de un sistema constructivo de bajo impacto ambiental y costo en propuestas de estructuras ligeras.

Es ampliamente conocida la tradicion del uso del bambu para la construccion con antecedentes trascendentales sobre todo en America Latina. Este material esta

considerado como un recurso invaluable en la conservación del equilibrio ecológico debido su rápido crecimiento captura altos volúmenes de CO₂ de la atmósfera. Además protege los suelos de la erosión y estabiliza la humedad ambiental y freática de las regiones de donde crece.

Un diseño en cuanto a la utilización de este material, es utilizar medias cañas para formar un elemento llamado polín de bambú ensamblado. La idea es que al seccionar el elemento se obtiene una pieza que preserve buenas partes de las capacidades resistentes, se obtiene un elemento sólido que en toda su longitud presenta caras planas que facilita la unión de otros componentes como muestra la figura 1.

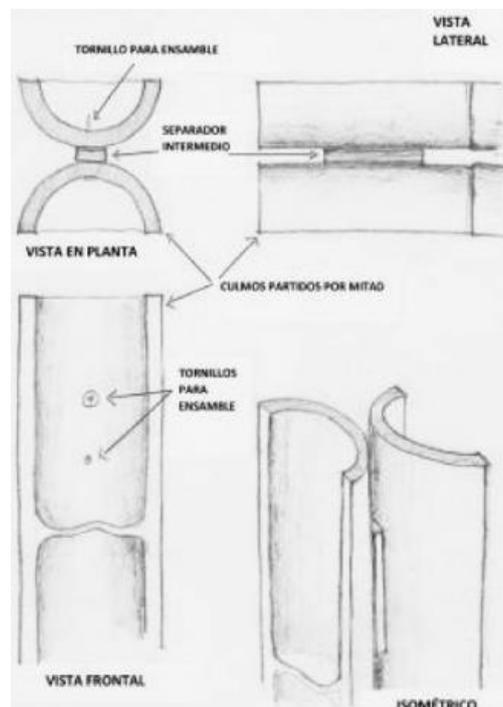


Figura 1. Ensamble de dos mitades de bambú conectados por su cara convexa.

Fuente: Soria-López, F. J., & Guerrero-Baca, L. F. (2019)

La factibilidad de este sistema constructivo radica en las excelentes propiedades mecánicas que tiene el bambú para su uso estructural como la resistencia a la compresión que alcanzan los polines cuando son colocados a manera de postes o columnas, como a la flexión en componentes horizontales para la creación de vigas. Se desarrolló la prefabricación de paneles como muestra la figura 2.



Figura 2. Paneles prefabricados a base de polines de bambú ensamblados.

Fuente: Soria-López, F. J., & Guerrero-Baca, L. F. (2019)

En conclusión, plantea que acorde a un buen diseño estructural a base de bambú, puede garantizar la viabilidad de la utilización de este material como alternativo al uso común de materiales convencionales de construcción, facilitando su implementación en obra, reducción de uso de energía y agua y sobre todo la notable reducción de costos debido a que la mano de obra requiere de poca capacitación y es un material ecológico y biodegradable que se lo puede encontrar fácilmente en la naturaleza. (Soria-López, F. J., & Guerrero-Baca, L. F. 2019)

Como tercer aporte en investigación en el ámbito de sostenibilidad dentro de la construcción, es la adición de plástico PET o plástico extruido, como lo relata la revista *Scientia et Technica* de la Universidad Tecnológica de Pereira, de la República de Colombia en el artículo de las Energías Alternativas, experiencias desde el semillero de investigación en tecnología de Salazar y et al. (2011) indica que, uno de los mejores

aportes ambientales lo representa el reciclaje de basuras, y en particular los plásticos como elemento de alto porcentaje en los residuos de viviendas e industrias. El semillero y el grupo de investigación en Tecnología Mecánica diseñaron y construyeron un módulo de vivienda eco sostenible cuyas paredes y techos se han construido en material reciclado de plástico y Tetrapak respectivamente. La vivienda se ha implementado en la Fundación Kyrios (centro de restauración de personas víctimas de problemas sociales: drogadicción, violencia, etc.). Las paredes y columnas estructurales de la vivienda son construidas de plástico extruido en los moldes respectivos. La materia prima la conforman plásticos como polietileno de baja y alta densidad y polietileno tereftalato PET (botellas). Las mezclas se realizan en función de la resistencia que requiere paredes y columnas. La figura 3 muestra el modelo tridimensional de estos elementos. El diseño de estos ladrillos permite ensamblar de forma traslapada uno a uno hasta completar paredes según diseño arquitectónico previsto inicialmente. (p. 264).



Figura 3. Sistema constructivo de bloques y columnas de plástico extruido.

Fuente: Disponible: <http://casadeplastico.org/index.php/medios/galeria>.

Como cuarto aporte en investigación corresponde a (Contreras-Miranda et al., 2010), quien realizó la publicación de: “Las técnicas de decisión multicriterio en la selección de componentes estructurales, a partir de la tecnología de la madera, para

construcción de viviendas sociales en Venezuela”. En dicho artículo, proponen metodologías de diseño que permitan en la fase de generación de alternativas, generar distintos métodos que logren seleccionar la satisfacción de las principales necesidades del proyecto planteado. Plantean el uso de la Metodología del Diseño Ambientalmente Integrado (DAI) y de las técnicas de decisión multicriterio. Llegaron a consolidar con éxito el desarrollo proyectual y conceptual de un nuevo componente constructivo con calidad estructural y nuevos procesos de utilización mediante la delimitación del proyecto. Generaron un total de 53 alternativas de elementos estructurales con la técnica creativa Tormenta de Ideas. Realización selección técnica según factores ambientales, socioeconómicos u tecnológicos con la que llegaron a obtener 7 alternativas que predominaron. Haciendo el uso del software Expert Choice 2000 para MCDM, lograron seleccionar de las siete alternativas el desarrollo de un producto forestal de madera laminada encolada realizado a partir de partículas de gramíneas como la caña brava, bambú o guadua para ser manufacturado con partículas de madera maciza de pino caribe obteniendo un material compuesto. La alternativa propuesta satisfacía con los requerimientos de los factores señalados en cuanto a costo, calidad, resistencia y principios de ecodiseño tales como: menor consumo de energía, uso de material primas alternas como las gramínea, reciclaje y reutilización de materias primas. (Contreras-Miranda et al., 2010)

Como quinto aporte en investigación corresponde a (Agarwal et al., 2014) quienes realizaron la publicación de: “Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns”. En dicho artículo plantean la utilización del uso de bambú como refuerzo al concreto donde realizan pruebas de tracción de las tiras de bambú para evaluar su resistencia final y sus propiedades de ingeniería. Utilización varios adhesivos como tratamiento para el bambú para estudiar

su efecto sobre la resistencia de la unión en la interfaz del compuesto de hormigón bambú. Realizaron pruebas de compresión axial y carga transversal en columnas reforzadas de acero y bambú para revelar la capacidad de carga, desviación lateral y el patrón de modo de falla. Además, realizaron pruebas de carga de dos puntos en n vigas para estudiar el comportamiento de este material compuesto sometidas a cargas de flexión. Destacaron que el bambú con un correcto tratamiento tiene el potencial de sustituir al acero como refuerzos en vigas y columnas. (Agarwal et al., 2014)

Como sexto aporte en investigación corresponde a (Pons & De La Fuente, 2013) quienes realizaron la publicación de: “Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns”. Presentaron un análisis general para el análisis integral de sostenibilidad en columnas mediante la evaluación MIVES, un modelo de evaluación de toma de decisiones de criterios múltiples que considera los planes principales de sostenibilidad como:

- Beneficios ambientales: mejorar y proteger los ecosistemas, mejorar calidad del aire y agua, disminuir corrientes de desechos en el aire y tierra y preservar y restaurar los recursos naturales y renovables.
- Beneficios económicos: disminución de costos operativos; crear, expandir y dar forma a mercados para productos ecológicos, mejorar la productividad de los ocupantes y optimizar el rendimiento económico del ciclo de vida.
- Beneficios sociales: mejorar la comodidad y la salud de los ocupantes, realzar cualidades estéticas, minimizar la presión sobre la infraestructura local y mejorar la calidad de vida en general.

En su trabajo han diseñado este método para evaluar columnas de hormigón armado en edificaciones in situ. Por lo tanto, la influencia de determinar variables como

la resistencia a la compresión del concreto, geometría de la sección transversal y el proceso de construcción se han estudiado en base a este modelo. Concluyendo que las columnas más sostenibles son aquellas que se basan en el uso de hormigones de alta resistencia a la compresión. Las columnas circulares tienen un índice de sostenibilidad más alto que aquellas con una sección transversal de geometría cuadrada, ya que permiten que un edificio cumpla con los requisitos estéticos exigentes y reducen los costos de mantenimiento en comparación a las columnas de geometría cuadrada.

Columna estructural

Las columnas son elementos verticales a compresión de los marcos estructurales, que sirven para apoyar las vigas cargadas. Son miembros encargados de transmitir cargas de los pisos superiores de una edificación hasta la planta baja y después al suelo a través de la cimentación. Puesto que son elementos sometidos principalmente a cargas de compresión, la falla de una columna en un lugar crítico de su longitud o geometría puede ocasionar un colapso progresivo de los pisos concurrentes y por el último el colapso total de la estructura. En términos económicos y de pérdidas humanas, la falla estructural de una columna es un evento de principal importancia para poder evitar este tipo de eventos. El reglamento ACI solicita un diseño de elementos sometidos a compresión se utilice factores de reducción de la resistencia ϕ , considerablemente menores que los factores ϕ para la flexión, cortante o la torsión. (Soto, 2009)

Las columnas se pueden clasificar en base a su forma y la disposición del refuerzo, la disposición de la carga en la sección transversal y por su longitud en relación con sus dimensiones laterales. La forma y el arreglo del refuerzo identifican a los tres tipos de columna, siendo las columnas con estribos más utilizadas por costos menores en construcción. (ver figura 4)

- Columnas rectangulares o cuadradas con refuerzo en espiral o con estribos laterales.
- Columnas circulares con refuerzo longitudinal de varillas y estribos laterales.

Cuando se requiere un incremento de ductilidad como es el caso en zonas sísmicas, también se usan columnas rectangulares o circulares con refuerzo en espiral. La característica de este tipo de columnas es evitar el colapso total de la estructura antes de que se complete la distribución total de momentos y esfuerzos.

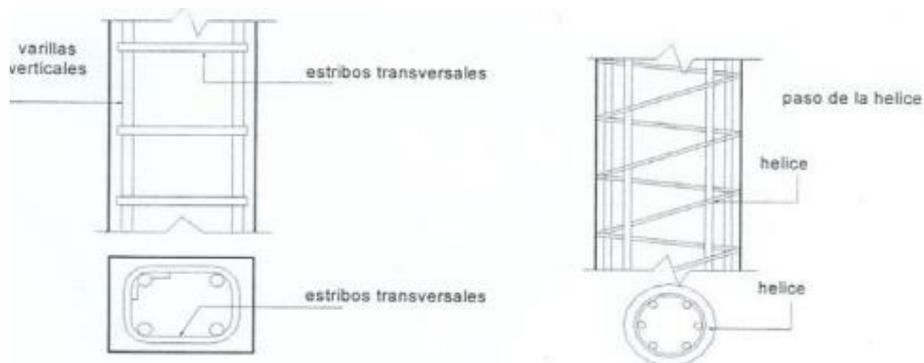


Figura 4. Tipos de secciones en columnas.

Fuente: (Soto, 2009)

Resistencia a la compresión

Se lo define como el esfuerzo máximo que soportará un material bajo carga de aplastamiento antes de llegar a su punto de fallo o ruptura del elemento. En cuanto a materiales que no llegan a presentar fisuras. Se lo limita como la fuerza máxima necesaria para deformar un material. La necesidad de trabajar con este tipo de ensayos está dada con el fin de conocer las mezclas idóneas que cumplan con los requerimientos de resistencia específica [$f'c$] por lo general en Ecuador existe el hormigón de resistencia de 210 Kg/cm^3 . El ensayo de compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste la carga cuyo resultado se lo obtiene en mega pascales [MPa].(Imcyc, 2006)

Tipos de defectos y fallos en ensayos de resistencia a la compresión.

La figura 5 muestra probetas sometidas principalmente a esfuerzos de compresión. Para lograr determinar la resistencia máxima de soporte del concreto pueden arrojar diferentes tipos de fallas.



Figura 5. Tipos de fallos y defectos en ensayos de compresión.

Fuente: (Laboratorio EPN, 2019)

La figura 5 muestra los tipos de falla que tiene una probeta ensayada a esfuerzos de compresión donde:

- Tipo 1: Se produce en muestras cuando es bien aplicada la carga de compresión sobre la cara de una probeta con una superficie plana.
- Tipo 2: Se produce en muestras que cuentan con conos bien formados en un extremo, fisuras verticales a través de los cabezales, como no bien definido en el otro extremo.
- Tipo 3: Se produce en muestras que presentan fisuras verticales encolumnadas a través de ambos extremos, conos mal formados.
- Tipo 4: Se observa una fractura diagonal sin fisuras a través de los extremos, es necesario golpear suavemente para poder distinguirla de la falla Tipo 1.
- Tipo 5: Se produce en muestras con concentraciones de esfuerzos en puntos sobresalientes de las caras de aplicación de carga, por deficiencias en el material.

- Tipo 6: Se observa en muestras que presentan una cara de aplicación cóncava y/o por deficiencias en el material.

Ensayo de un material.

Para lograr determinar las propiedades mecánicas que caracterizan a un material es necesario realizar ensayos, éstos a su vez se subdividen en destructivos y no destructivos.(Rojas, 2015)

Ensayo destructivo.

Los ensayos destructivos, son aquellos que como su nombre lo indica, destruyen o deforman el material a ensayar como el concreto. Para poder recabar información para un posterior análisis, existen varios tipos de ensayos destructivos, como lo son el de tracción, compresión, flexión, torsión, etc.(Rojas, 2015)

Sin embargo, este tipo de ensayos se los puede determinar mediante un análisis de elementos finitos en software computacional. donde se puede predecir similares características obtenidas de este tipo de ensayos físicos ahorrando tiempo y dinero en un proceso constructivo y de diseño.

Análisis FEA (Finite Elements Analysis)

Para un diseño óptimo de un elemento estructural, como una columna, se diseña usualmente para que falle de una manera gradual, este criterio se lo reconoce cuando, un elemento es capaz de resistir de forma más segura cargas más allá de su límite o rango elástico, esto siempre y cuando exista una ductilidad mínima.(Sánchez & Cevallos, 2015)

Adicionalmente, el uso de ordenadores y distintos softwares de diseño, permite el dimensionamiento y diseño de cada elemento compuesto de la estructura de forma independiente, separando los demás elementos para obtener un elemento aislado de los

demás elementos de un ensamble o conjunto en el que modelos estructurales tridimensionales son indispensables. (Mayes, R. L., & Naeim, F. 2001)

Uno de los métodos más usados para el análisis de elementos, es el FEA (Finite Elements Analysis), es un método de simulación numérica para la solución de problemas de alta complejidad, es utilizado para la fabricación de productos y prototipos digitales para explorar ideas antes de su fabricación donde permite analizar tensiones, deformaciones y temperaturas para predecir el rendimiento de uso planificado, esto con el propósito de economizar recursos económicos, donde los beneficios son:

- Predecir posibles fallas con abuso predecible.
- Evaluar y corregir fallas observadas de un elemento.
- Mejorar el rendimiento y la seguridad de un diseño conocido.
- Mejora el costo / peso de un diseño mediante optimizaciones geométricas.
- Desarrollar conceptos nuevos e innovadores.
- Obtener información de conceptos de diseño o instrucciones.

Para la aplicación, el diseño de columnas en zonas de alto riesgo sísmico, se recomienda el criterio de columna fuerte – viga débil, que involucra que el daño ante cargas sísmicas que exigen a una estructura más allá de su límite elástico debe ocurrir principalmente en las vigas. Este criterio reconoce la importancia de evitar que una columna presente en conjunto pueda colapsar o llegar al fallo de forma rápida de la estructura. (NEC-15, NEC-SE-DS. 2014) y (NEC-15, NEC-SE-HM. 2014)

Normas

Normativa NEC

Es importante mencionar que al trabajar con elementos estructurales para la construcción, como lo menciona el presente proyecto de investigación, la propuesta de vivienda planteada trabajara acorde a normativas vigentes en el país (Ecuador) como indica la Cámara de la Construcción de Quito es la entidad encargada de la coordinación de la elaboración de Norma Ecuatoriana de Construcción, tiene como objetivo principal, regular los procesos que permiten cumplir con las exigencias básicas de seguridad y calidad en todo tipo de edificaciones con respecto a la seguridad, uso y mantenimiento de instalaciones de uso público y de vivienda. Los requisitos establecidos en esta normativa son de uso obligatorio a nivel nacional, el cual se debe cumplir con todos los profesionales, empresas e instituciones públicas y privadas, y deben garantizar que se cumplan cada uno de los requisitos plasmados en la norma. (NEC, 2014)

La estructura de esta normativa tiene varios capítulos, contemplando tres ejes principales:

1. Seguridad estructural de las edificaciones.
2. Habitabilidad y salud, basados en la funcionalidad de las edificaciones.
3. Distribución de Servicios Básicos.

Los índices que más se tomara en cuenta para el desarrollo del presente proyecto se basa más que todo en el enfoque de estructuras como:

1. NEC-SE-RE: Rehabilitación Sísmica de Estructuras

Detalla la rehabilitación sísmica de edificaciones existentes que establece alineamientos de evaluación de riesgo sísmico en los edificios o viviendas, este incluye parámetros en la inspección y evaluación rápida de estructuras con la valoración de probabilidades en pérdida de materiales que garantice una gestión efectiva del riesgo sísmico existente catalogado por zonas de mayor riesgo en el Ecuador. (NEC. 2014)

2. NEC-SE-GM: Geotecnia y Diseño de Cimentaciones

Contempla criterios de estudios básicos con respecto a la utilización en los estudios geotécnicos para edificaciones, basados en la investigación del subsuelo, proveyendo recomendaciones de diseño para futuras cimentaciones, rehabilitación o reforzamiento de estructuras ya existentes. (NEC. 2014)

3. NEC-SE-CG: Cargas (no sísmicas)

Contempla factores de cargas no sísmicas que se deben considerar para el cálculo estructural de edificaciones como: cargas permanentes, cargas variables, cargas accidentales y combinación de cargas. (NEC. 2014)

4. NEC-SE-DS: Cargas Sísmicas: Diseño Sismo Resistente

Detalla criterios técnicos y metodológicos aplicados para el diseño sismo resistente de las edificaciones, estableciendo especificaciones básicas y mínimas al cálculo estructural sujetas a los efectos sísmicos. (NEC. 2014)

5. NEC-SE-HM: Estructuras de Hormigón Armado

Contempla el análisis y dimensionamiento de elementos estructurales de hormigón armado, cumpliendo con especificaciones técnicas en normativas nacionales e internacionales. (NEC. 2014)

6. NEC-SE-MP: Estructuras de Mampostería Estructural

Contempla criterios y requisitos mínimos en diseño y construcción de mampostería estructural, para lograr un comportamiento apropiado bajo cargas de tipo vertical, permanente o transitorio, bajo fuerzas laterales o fuerzas atípicas. (NEC. 2014)

Selección de materiales y métodos multicriterio

La selección de materiales es una de las etapas más importantes dentro del diseño de productos. En el ámbito de la ingeniería, la selección de materiales es el proceso que tiene como objetivo identificar el material apropiado para los distintos procesos de fabricación de un producto o elemento.

Durante la fase de diseño, los diseñadores deben conocer los requisitos que debe cumplir el producto, debido a que cada material tiene sus propias características mecánicas como resistencia, conductividad térmica, densidad, etc. Un diseño exige ciertos parámetros para poder garantizar sus requisitos funcionales donde determinaran la calidad y el rendimiento del producto. Por lo tanto, la selección de materiales se vuelve una etapa crucial y crítica dentro de la elaboración de productos. Chiner ha propuesto cinco pasos para la selección de un material, como: claridad del modelo de diseño, evaluación de las propiedades del material, selección del material candidato, evaluación y juicio para una solución óptima y comprobación del material mediante pruebas. (Chiner, 1988)

Actualmente, el incremento de investigaciones en el diseño de productos sostenibles es de mayor interés en el ámbito de controlar la contaminación generada por diversos productos acorde las normativas de regulación ambiental vigentes en cada país. El esfuerzo de desarrollar productos sostenibles se lo realiza mediante diversas estrategias que tienen un objetivo común, el de reducir el flujo de residuos y disminuir el uso de los recursos naturales. La compleja relación existente entre los parámetros de selección aumenta la complejidad de la selección y, por lo tanto, la selección de materiales se convierte en un problema de decisiones de criterios múltiples. En el contexto de ciclo de vida del producto, el reciclaje de este prolongara su vida útil (reciclabilidad significa el potencial del producto para ser reciclado al final de su vida útil) donde la prolongación de este resulta la preservación de recursos naturales. La selección de materiales en cuanto a la cantidad de material utilizado en la selección de materiales, es ampliamente conocido que existen dos distintas categorías como: la selección de material único y selección de materiales múltiples.(Sakundarini et al., 2013)

Por otro lado, el desarrollo reciente de la económica y urbanización a nivel mundial, la creciente presión de las crisis ambientales, el crecimiento acelerado de la población humana, el agotamiento de los recursos naturales, el daño de los ecosistemas y la búsqueda constante de la felicidad han promovido la creación de diseño y construcción de viviendas en términos de sostenibilidad. Destacando la importancia de los edificios donde se vive, trabaja y se convive diariamente, la protección que ofrece de la interferencia externa. Tienen un impacto significativo en la salud, seguridad y comodidad de los individuos. Esto conlleva a la investigación de nuevos materiales que satisfagan las distintas necesidades del hombre destacando el régimen ambiental para reducir la contaminación y uso de energía. Los edificios sostenibles que intentan minimizar el impacto negativo en la salud y medio ambiente juegan un papel crucial en el logro del objetivo global “ciudades y comunidades sostenibles”, donde es uno de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) planteado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). (Chen et al., 2019)

La selección adecuada de materiales es una tarea muy desafiante y multifacética para diversas aplicaciones de Ingeniería. En el mercado existen más de 100000 materiales donde cada uno de ellos tiene sus puntos fuertes y puntos débiles no se puede obtener la opción perfecta. Esto se vuelve un tema complicado en cuanto al desarrollo de ciudades y viviendas sostenibles, debido a que el material a utilizar en este tipo de aplicaciones debe satisfacer los distintos procesos de diseño arquitectónico. Al ser elementos estructurales deben cumplir con diversos requerimientos económicos, físicos y mecánicos para satisfacer el confort y seguridad de sus ocupantes y de igual manera, satisfacer el diseño en términos de sostenibilidad. Es por ello que, para la selección de materiales como la selección de material único, varios investigadores han realizado contribuciones de investigación en el desarrollo de métodos de evaluación utilizando

herramientas de toma de decisiones y herramientas de optimización. Con respecto al método de evaluación de selección de material, identificaron dos métodos favorables: la toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM) y los métodos de optimización.

(Sharma, P. K., Aggarwal, A., & Gupta, R. 1993)

Por lo tanto, la solución viable a este tipo de problemas de selección de materiales con varios factores de decisión compatible e incompatible se puede manejar fácilmente con la aplicación y utilización de métodos de toma de decisiones con criterios múltiples, acorde con la toma de criterios por parte del selector basado en las características y aplicaciones que debe tener el elemento que satisfaga requerimientos de diseño. Una de las técnicas más populares en el área de selección de materiales mediante MCDM son los métodos: COPRAS (Complex Proportional Assessment), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) y VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, término Serbio) destacando su aplicación en varios estudios de selección de materiales alternativos en términos de desarrollo sostenible, como lo menciona el importante estudio de (Mousavi-Nasab & Sotoudeh-Anvari, 2017), los autores han investigado las propiedades básicas del problema general de selección de material sustentable, de igual manera mencionan mediante la revisión y estudio la fuerza y limitaciones de la mayoría de los MCDM en el campo de la selección de materiales sustentables donde los resultados de su trabajo dictaron que los métodos COPRAS y TOPSIS son los mejores métodos de decisión multicriterio para este tipo de aplicación. Se puede obtener mayor información de su estudio titulado “A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems”

Un diseño común de un marco de MCDM, se representa en un modelo llamado matriz de decisión, al considerar esta matriz el trabajo de un DM (Decision-making) es

identificar la mejor opción (clasificar alternativas) mediante técnicas de MCDM. Cabe destacar que, en este tipo de problemas, los atributos se dividen en dos grupos generales: el factor en el que una puntuación más alta será el factor de beneficio y el factor con menor puntuación será el criterio no beneficioso. (Mousavi-Nasab & Sotoudeh-Anvari, 2018)

La normalización de la matriz de decisión es el primer paso en casi todos los métodos de decisión multicriterio MCDM donde (Jahan & Edwards, 2015) presentaron una buena encuesta sobre técnicas de normalización en métodos MCDM, el lector puede obtener mayor información de su trabajo titulado “A state-of-the-art survey on the influence of normalization techniques in ranking: Improving the materials selection process in engineering design”.

Determinar el peso de los criterios es otro paso importante dentro del proceso de selección de MCDM, donde los criterios de ponderación son valores positivos que muestran la importancia relativa de varios factores de decisión, donde un mal proceso de ponderación dentro de una técnica de decisión multicriterio, el resultado de la técnica se producirá de una manera incorrecta. Existen varias técnicas de ponderación de pesos como el método de entropía, la lógica digital AHP, enfoque de Desviación Estándar, DoE4 y método de variación estadística donde cada enfoque tiene sus características que lo diferencia. Cabe destacar que, debido a que los enfoques de decisión multicriterio y técnicas de ponderación de pesos, su clasificación puede variar para un problema determinado, por lo que al final de su aplicación la “prueba de correlación de Spearman” se ejecuta para determinar similitudes entre los métodos MCDM utilizados en la investigación de selección de materiales.

Mencionado lo anterior, se destaca la importancia de la utilización y aplicación de este tipo de métodos de decisión de criterios múltiples para cumplir de una manera

eficiente distintos objetivos que puedan ser planteados dentro del ámbito económico, social, industrial y selección de materiales, si bien son técnicas desarrolladas a partir de la segunda mitad del siglo XX, han cobrado fuerza durante los últimos años permitiendo facilitar el proceso de decisión por parte de distintas organizaciones donde ha favorecido la proliferación de estas herramientas en su adaptación a un número finito de campos orientando al decisor en la toma de decisiones complejas tomando en cuenta criterios y alternativas. (Cabello, 2017)

Hoy en día el desarrollo tecnológico, han creado base de datos de un número finito de materiales existentes en nuestro entorno, herramientas de comparación que facilitan la labor en la selección mediante instrucciones simples, que permiten la delimitación y restricciones que pueden ser impuestas por la persona interesada en realizar un proceso de selección y toma de decisiones como CES Edupack Granta Design. (Ashby M. F., 2012)

Software de selección CES Edupack Granta Design

CES Edupack es un software en el que agrupa un conjunto muy amplio de diferentes herramientas de aprendizaje, con el soporte de un sin número de materiales en diferentes áreas de ingeniería, diseño, ciencia y desarrollo sustentable. Este software contiene una base de datos muy amplia y completa en cuanto a materiales e información de procesos, poderosas herramientas y recursos de apoyo para el usuario, como: libros de texto, conferencias y recursos de aprendizaje respecto a artículos de investigación realizados con este software. (Grantadesign, 2016).

Este software posee categorías y niveles en su biblioteca de materiales, esto dependerá del problema de selección que la persona a cargo este tratando y de su necesidad al implementarlo en un proyecto, se puede elegir entre diferentes grupos de materiales que cumplan con los requisitos para el diseño.

En la figura 6, se muestra la base de datos disponibles en el software que cuenta con dos grupos: introductorios y avanzados.



Figura 6. Base de datos disponible en CES Edupack.

Fuente: (CES EDUPACK, 2016)

Destacando el nivel 1 de búsqueda, contiene información de más de 60 materiales que son utilizados en mayor frecuencia, este sirve como una introducción a este mundo de la elección de materiales para los estudiantes. El nivel 2 contiene información de más de 100 materiales y el nivel 3 contiene más de 3900 materiales, que incluye, fibras y materiales particularizados que pueden ser utilizados en el desarrollo de diferentes proyectos y diseños reales, contiene una gran lista de propiedades mecánicas, térmicas, ópticas y eléctricas, consta también de datos para materiales aeroespaciales, polímeros usados en la industria, materiales que son amigables con el medio ambiente y biotecnología. (Salazar Loor, R. B. 2018)

Uno de los métodos más usados en la selección y comparación de materiales dentro del software, es el método gráfico; este método se apoya en graficas (conocidas como mapas de materiales) donde se relacionan en pares ciertas propiedades de los materiales como muestra el siguiente ejemplo de selección de materiales estructurales para edificios en base al costo planteado por Ashby en su libro “Materials Selection un

Mechanical Design” capítulo 6, sección 6.5, menciona que, la inversión más grande que las personas hacen a lo largo de sus vidas es la compra de una vivienda donde aproximadamente la mitad del gasto de construcción es el costo de los materiales y se usan en grandes cantidades por ejemplo, una casa familiar utiliza alrededor de 200 toneladas de material, un bloque de departamentos alrededor de 20,000 toneladas; los materiales son utilizados de tres distintas maneras: estructurales para mantener erguido a un edificio; como revestimiento para protección de agentes externos del ambiente como lluvia, viento, nieve; y como elementos internos enfocados al confort térmico y acústico de la vivienda. Ashby considera la selección de materiales para la estructura (figura 7) donde sus elementos que lo componen deben ser rígidos, fuertes y de bajo costo. (Ashby, 2010)

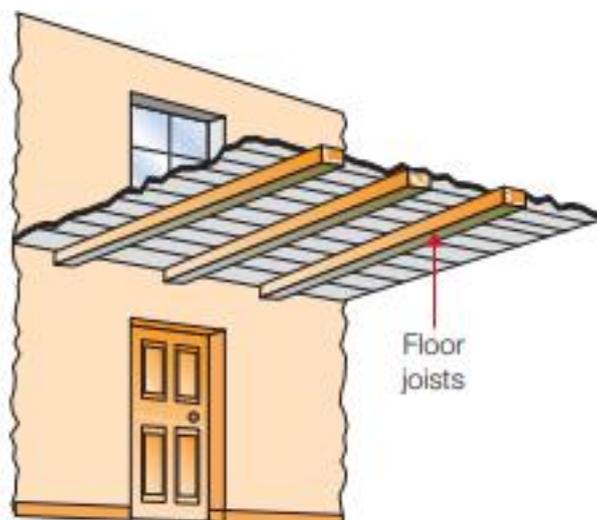


Figura 7. Selección de materiales para estructura planteada por Ashby.

Fuente: (Ashby, 2010)

La estructura debe ser rígida, para que el edificio no presente esfuerzos de flexión en sus elementos bajo distintas cargas externas como viento y cargas internas de la estructura; fuerte, para que no exista riesgos de colapso de la estructura. y barato por la alta demanda de materiales que conlleva la construcción de este.

Los criterios de diseño para vigas de pisos propuestos por Ashby se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Requerimientos de diseño para vigas de piso.

Función	Viga de piso
Restricciones	Longitud L específica Rigidez: no debe desviarse demasiado bajo cargas de diseño Resistencia: no debe fallar bajo cargas de diseño
Objetivo	Minimizar costos, C
Variables libres	Áreas de sección transversales de la viga

Fuente:(Ashby, 2010)

El objetivo del diseño es simple obtener una buena rigidez y resistencia del material a un costo mínimo, donde las vigas de piso están cargadas a flexión y el costo de las vigas es su masa multiplicado por el costo por Kg del material del que esta echo, estos índices son índices de rendimiento acorde a los requerimientos físico y mecánicos del elemento estructural, para el caso de una viga el índice de rendimiento será esfuerzo de flexión de materiales a un costo mínimo, en el caso de una columna será el esfuerzo de compresión a un costo mínimo, el lector puede obtener más información acerca de los índices de rendimiento en el libro mencionado de Ashby o en CES Edupack 2019, aprende en línea.

La figura 8, muestra el grafico de rigidez obtenido mediante la aplicación de índices de rendimiento para el ejemplo planteado, módulo de elasticidad E vs el costo relativo por unidad de volumen, la banda sombreada tiene la pendiente apropiada; aísla al hormigón, piedra, ladrillo, maderas, fundiciones de aceros al carbono.

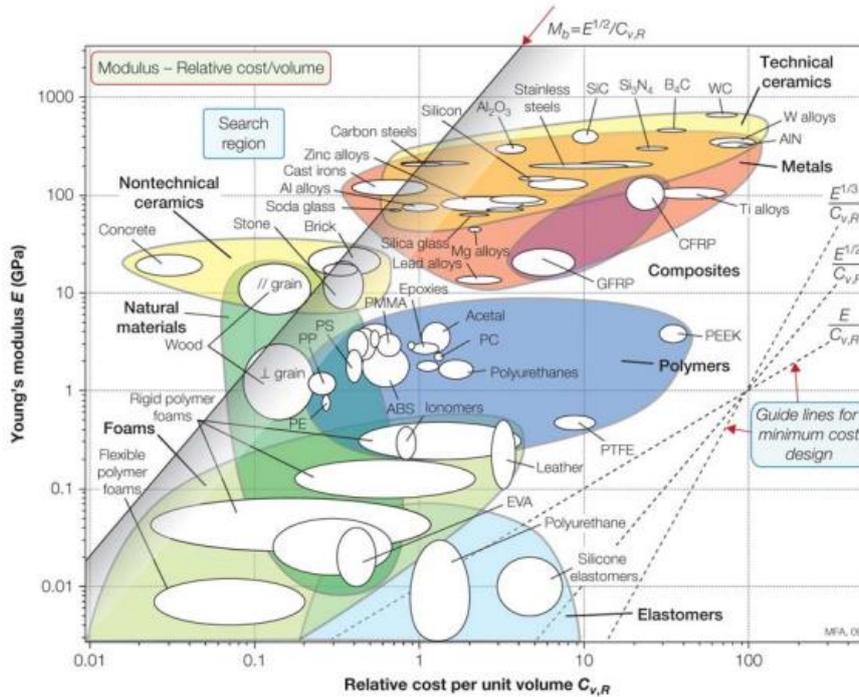


Figura 8. Selección de materiales económicos y rígidos para los marcos estructurales de edificios.

Fuente: (Ashby, 2010)

La figura 9, muestra la resistencia frente al costo relativo, la banda sombreada o pendiente, esta vez ofrece casi la misma selección, destacando materiales como el hormigón, ladrillo, roca, maderas, hierros fundidos y aceros el cual son exactamente los materiales utilizados en la construcción de edificaciones.

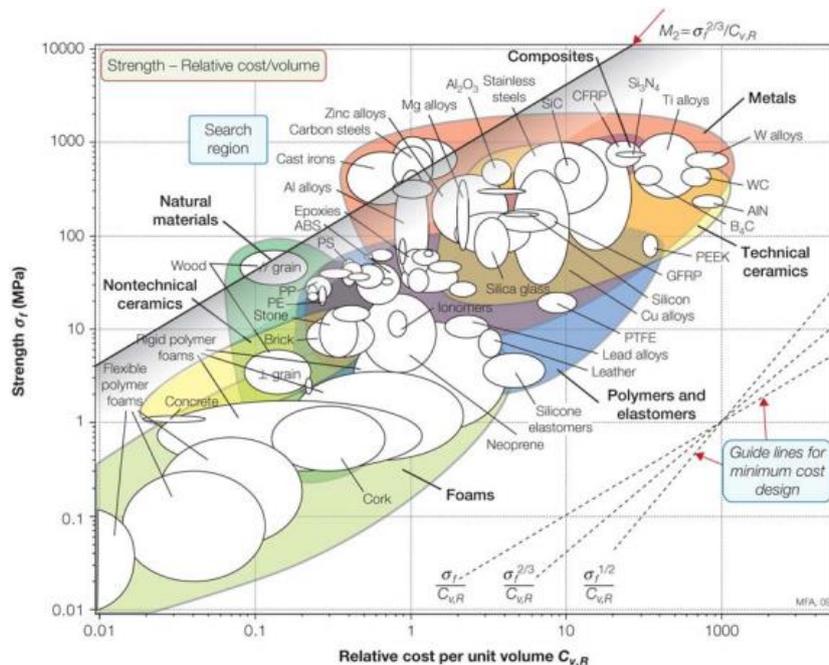


Figura 9. Selección de materiales económicos y resistentes para estructuras.

Fuente: (Ashby, 2010)

Materiales como el hormigón, piedra y ladrillo tienen una elevada resistencia a la compresión donde la aplicación en columnas y arcos es la aplicación más recomendable. La madera, acero y hormigón armado tienen resistencia tanto en tensión, flexión y compresión, el acero se lo puede dar formas en distintos perfiles en I, C, H, etc. (Ashby, 2010)

La importancia de trabajar con este software en cuanto a la selección de materiales, es la facilidad de accesibilidad a la base de datos sobre materiales, procesos e información exhaustiva sobre propiedades técnicas, económicas y medioambientales donde los tres niveles de búsqueda que incorpora el software aportan información invaluable para realizar y solucionar distintos objetivos planteados por los usuarios, destacando lo más importante, realizar diseños en términos de sostenibilidad y proyectos de bajo costo mediante la aplicación de índices de rendimiento.

Índices de rendimiento

El rendimiento de un material, ρ , se mide mediante una ecuación de rendimiento que contiene grupos de distintas propiedades de los materiales. Estos grupos son los índices de rendimiento. Muchas veces dicho grupo, es una propiedad única; así, si el rendimiento de la longitud de una viga se mide por su rigidez, la ecuación de rendimiento tendrá una sola propiedad el módulo elástico E donde será el índice de rendimiento para dicho problema. Mas comúnmente, la ecuación de rendimiento contiene un grupo de dos o más propiedades. Un ejemplo familiar es la rigidez específica, E/ρ , y la resistencia específica, σ_y/ρ (donde E es el módulo de Young, σ_y es el límite elástico y ρ la densidad) pero existen varios tipos de índices de rendimiento según los objetivos que se plantee la persona en cuanto a términos de sostenibilidad, materiales de construcción, etc., donde el seleccionador tiene que tener criterios claros de la aplicación del elemento para poder aplicar estos índices, la importancia de estos,

es trabajar acorde a objetivos planteados, se puede trabajar con índices de diseño de rigidez limitada con un impacto ambiental o costo mínimo con el fin de obtener gráficos como muestran la figura 7 para poder caracterizar materiales acorde a diseños planteados. Ashby, M. F. (2012).

Métodos de selección multicriterio (MCDM)

A diario se nos plantea diferentes circunstancias y problemas que conlleva a la toma de decisiones, y esto a menudo lo realizamos de una manera automática, pero cuando se desenvuelve en un mundo empresarial o ingenieril, se necesita apoyarse en modelos matemáticos de decisión, así cuando contamos con varios criterios estaremos apoyados en modelos de toma de decisiones de criterios múltiples (Multiple-criteria decisión-making, MCDM). Estos modelos pueden ayudar a mejorar la calidad de toma decisiones de una manera racional y eficiente. (Chen et al. 1992)

En el campo de la ingeniería, al igual que en cualquier otro campo de estudio, en cuanto al diseño y planificación, existe el momento en el que se debe tomar decisiones que dependerán en un gran porcentaje el éxito de un proyecto de cualquier índole. De esto surge la necesidad de poseer uno o varios métodos que puedan respaldar una elección determinada; para esto se han desarrollado diversos métodos de toma de decisiones como los MCDM, que se caracterizan por equiparar variables y o criterios para luego ser transformadas en algoritmos o modelos matemáticos. No existe una metodología determinada para la selección de este método, ya que todos están diseñados para el mismo fin, sin embargo, hay varios métodos destinados o especiales para la toma decisiones acorde con el usuario y su aplicación, el usuario deberá determinar el mejor método para poder ser aplicado a su caso de estudio. (Portilla Hernández, J. E. 2019).

Numerosos métodos multicriterio han cobrado fuerza en los últimos años para la toma de decisiones adecuadas en cuanto a la selección de materiales, destacando el método COPRAS (Complex Proportional Assessment), TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) y VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, término Serbio) donde su aplicación en varios estudios de selección de materiales alternativos en términos de desarrollo sostenible, como lo menciona el importante estudio de (Mousavi-Nasab & Sotoudeh-Anvari, 2017) han tenido los mejores resultados de selección de materiales óptimos para su aplicación. Dicho lo anterior, para la presente investigación se utilizará los métodos antes mencionados por los resultados obtenidos en varias investigaciones siendo los más utilizados para este tipo de aplicaciones. Se añadirá el Método DOMINIC para poder obtener mayor comparativa entre métodos de selección.

Método VIKOR

VIKOR proporciona para un conjunto determinado de alternativas una o varias soluciones de compromiso. Es apropiado para resolver problemas de decisión en conflicto y no conmensurables o en el caso de que exista criterios cuantitativos y cualitativos. (Muñoz Medina & Romana García, 2016)

El concepto fundamental de este método se basa en definir distintas soluciones ideales positivas y negativas. La solución ideal positiva indicará el valor más alto de la mejor alternativa que estará valorada con una puntuación de 100. La solución ideal negativa indicará el valor más bajo de la alternativa con una puntuación de 0 (Jeya Girubha & Vinodh, 2012). Es decir, este proceso es utilizado cuando existe la inseguridad de posición de prioridades.

Método TOPSIS

TOPSIS es un método MCDM propuesto por Hwang y Yoon en 1981. El principio operativo se basa en que la solución óptima debe satisfacer ciertas condiciones, es decir, la distancia más corta desde la solución ideal positiva y la distancia más larga desde la solución ideal negativa. Se ha aplicado este método comúnmente en varios campos como, por ejemplo: selección de armas, selección de materiales y evaluación entre posibles alternativas. (Zhang et al., 2017)

Este método intenta optar por alternativas y dar soluciones viables que simultáneamente tiene la opción de elegir la opción más próxima a la ideal. Toma como referencia el valor ideal y anti-ideal.(Pérez Domínguez et al., 2017)

Estas soluciones artificiales indicaran en que posición se encuentra cada valor acorde con los criterios a obtener hasta los criterios menos deseados.

Método COPRAS

En 1996, los investigadores de la Universidad Técnica Vilnius Gediminas, crearon un método de evaluación proporcional complejo COPRAS (Evaluación Proporcional Compleja). Se usa generalmente para la evaluación multicriterio de maximización y minimización de los valores de criterios.(Podvezko, 2011)

Este método selecciona las mejores alternativas de decisión, considera soluciones ideales, de igual manera considera soluciones no ideales, en una clasificación y evaluación paso a paso de las alternativas en términos de su importancia y el grado de su utilidad. (Martínez Gómez et al., 2018)

Método DOMINIC

Para Martínez, el método DOMINIC es un “Método cualitativo de selección de materiales, que considera factores de peso en los criterios de selección. Se elabora con

matrices, en las filas se incluirán criterios y factores de peso, en las columnas contendrán materiales candidatos, identificados con una letra” (2015, p. 116).

Para la presente investigación se ha tomado en cuenta métodos en donde tiene respaldos y antecedentes científicos y matemáticos de haber funcionado de una manera adecuada en otro tipo de investigaciones con lo que respecta a la selección de materiales. Lo que se espera, es hallar el material apto de una lista de materiales que tenga características similares a la de un material base que se desea reemplazar.

Los métodos multicriterio que serán aplicados para la toma de decisiones de criterios múltiples en el proyecto son: TOPSIS, VIKOR, COPRAS Y DOMINIC, en el que se podrá obtener de una manera gráfica para facilitar su análisis con resultados cuantitativos para posicionar al material preponderante como se muestra un ejemplo en la figura 10.

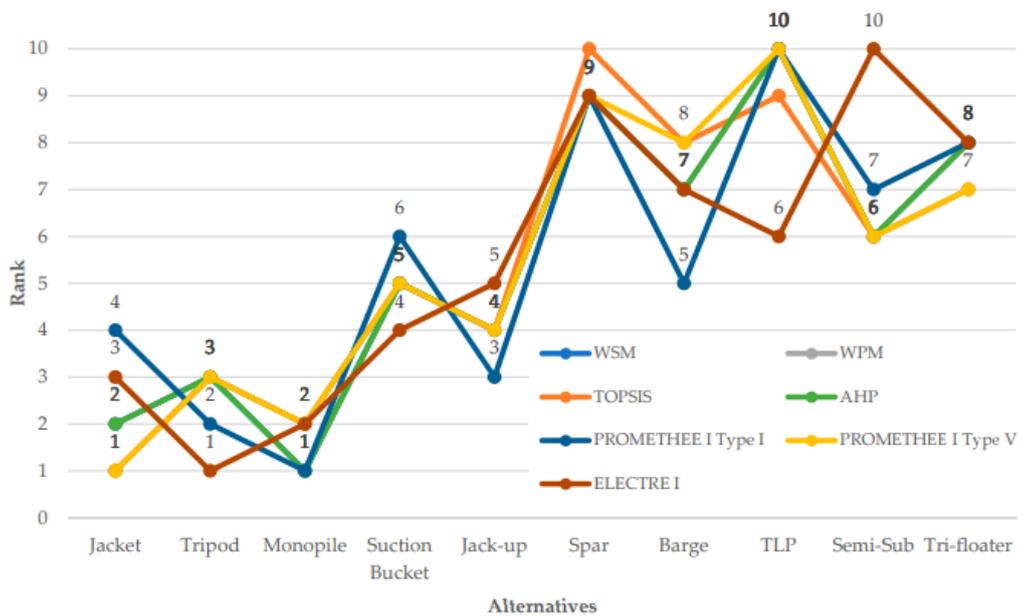


Figura 10. Grafica de comparación de Métodos Multicriterio (MCDM).

Fuente: (Kolios, Mytilinou, Lozano Minguez, & Salonitis, 2016)

Coefficiente de SPEARMAN

Una vez culminado el proceso de obtención de resultados de los MCDM, es importante realizar una medición por medio de la correlación existente entre cada uno

de los criterios que fueron analizados, para esto se utilizará una herramienta denominada como Correlación de Spearman. Según (Mondragón Barrera, 2014), el coeficiente de correlación de Spearman puede determinar desde -1.0 hasta +1.0 y lo interpreta de la siguiente manera: “Los valores cercanos a +1.0, indican que existe una fuerte asociación entre las clasificaciones, que a medida que aumenta un rango el otro también aumenta; los valores cercanos a -1.0 señalan que hay una fuerte asociación negativa entre las clasificaciones”, esto quiere decir que al aumentar el rango, el otro decrece y cuando el valor es igual a 0, no existirá una correlación. (2014, p. 98-104)

Método

Funcionamiento y falla de una columna estructural

Las columnas son elementos verticales que soportan principalmente fuerzas de compresión y flexión, cuya función principal es el de transmitir todas las cargas de la estructura a la cimentación; es decir, son uno de los elementos más importantes para el soporte de la estructura por lo que su diseño y construcción requiere de un especial cuidado. Las columnas son diseñadas con una sección y refuerzo según los esfuerzos que debe resistir, generalmente los esfuerzos se reparten longitudinalmente simétricos en la cara de la sección para evitar excentricidades en el elemento; se clasifican de acuerdo con su geometría, pueden ser cuadradas, rectangulares, redondas, tipo L, tipo cruz, tipo T, etc.

La falla en columnas es frecuente durante un sismo o por la sobrecarga aplicada al elemento consecuencia de un mal diseño, que en muchas ocasiones causa el colapso en las edificaciones. El sismo producido en Ecuador de magnitud 7.8 (Mw) el 16 de abril de 2016, determinaron que la falla o colapso de las estructuras en las ciudades estudiadas cambiaron progresivamente sus columnas al introducir nuevos materiales y tecnologías, transformando columnas regulares, con similar distribución de masas y limitada esbeltez en edificios bajos de una o dos plantas donde el mayor riesgo era la colindancia de las edificaciones; en columnas esbeltez. Irregularmente distribuidas u omitidas en planta, diversas alturas donde la falta de criterios fue la principal falla y colapso de los edificios y viviendas como se puede observar en la figura 11. (Castañeda & Bravo, 2017)



Figura 11. Cambios de esbeltez en columnas por cambios de la arquitectura de la ciudad

Fuente: (Castañeda & Bravo, 2017)

La importancia de un buen diseño de una columna garantiza el correcto funcionamiento de una estructura, al ser un elemento encargado de soportar principalmente cargas y esfuerzos de compresión y flexión, el principal criterio es el concepto de viga débil columna fuerte, donde supone permitir la deformación de rotulas plásticas en las vigas y evitarlas en las columnas durante un terremoto, de este modo, garantiza la seguridad de sus ocupantes bajo acciones sísmicas garantizando que la edificación o vivienda no colapsen.

Características del hormigón aplicado a una columna estructural

En este punto se determina las características físicas y mecánicas que poseen los materiales, esto con la ayuda del software CES Edupack GRANTA DESIGN que facilitara el proceso de obtención.

Hormigón

El hormigón es un material compuesto complejo. La matriz generalmente es de cemento Portland, utiliza como refuerzo arena y grava como agregados y ocupan entre el 60 y el 80% del volumen. El agregado en el hormigón aumenta sus rigidez y resistencia reduciendo el coste ya que el tipo de agregados utilizados son económicos; el

hormigón posee la característica principal de resistencia a compresión, pero se fractura fácilmente a tracción, sin embargo, para contrarrestar esta limitación que presenta el hormigón por si solo es agregar refuerzos de acero en forma de alambre, malla o varillas de acero con perfiles superficiales para poder anclarlos al hormigón, la junta de estos dos elementos conforman un solo sólido, denominado hormigón armado que puede soportar cargas útiles de tracción incluso cuando el elemento se encuentra agrietado. (CES EDUPACK, 2016)

Las propiedades del concreto son las siguientes:

- **Trabajabilidad.** Propiedad principal del concreto para el uso en el ámbito de la construcción, en esencia es la factibilidad que posee este material para poder mezclar sus agregados donde la mezcla de este es fácilmente transportable, manejable y puede colocarse fácilmente en moldes sin perder su homogeneidad.
- **Durabilidad.** El hormigón es capaz de resistir todos los factores climáticos, es de igual tiene la característica de permeabilidad que es la resistencia a ataques químicos.
- **Densidad.** Varía entre $0.5 T_N/m^3$ en hormigones celulares a $6 T_N/m^3$ en hormigones pesados y en hormigones armados hasta $2.5 T_N/m^3$.
- **Resistencia a la compresión.** Material altamente resistente a esfuerzos de compresión, tracción y flexión. La resistencia a la compresión que presenta frente a las demás es la más elevada, siendo unas diez veces el esfuerzo de tracción.

Determinación de geometría y precio de columna de hormigón armado.

De acuerdo con la localización del proyecto en la comunidad de Limoncocha, que es un sector con alto índice de humedad y calor (zona Oriental de Ecuador), la

longitud de una columna es de 3 metros para la construcción donde estos factores predominan, a comparación de la sierra ecuatoriana donde predomina en mayor parte el frío, para el diseño se toma en cuenta columnas de 2 a 2.4 metros de altura. Estas dimensiones esencialmente, de 3 metros servirá para la ventilación dentro de una vivienda en comparación con una columna de 2 a 2.4, servirán esencialmente para mantener el calor dentro de la vivienda.

Las dimensiones de la columna serán de 20cm x 25cm x 3m, se toma un perfil rectangular, con el propósito de saber el área de menor inercia de la columna para poder predecir el pandeo ya sea en el eje Y o X.

Para poder determinar el costo de fabricación de una sola columna de hormigón armado, se utilizó un módulo online de CYPE Cad (Generador de precios Ecuador) donde se utilizaron los siguientes parámetros como muestra figura 12.

Revisión Independiente ✓

IECA ✓

Tipo de sección

Rectangular o cuadrada

Sección media (cm)

Dimensión 'A' (cm)							Dimensión 'B' (cm)										
<input checked="" type="radio"/> 20	<input type="radio"/> 25	<input type="radio"/> 30	<input type="radio"/> 35	<input type="radio"/> 40	<input type="radio"/> 45	<input type="radio"/> 50	<input checked="" type="radio"/> 25	<input type="radio"/> 30	<input type="radio"/> 35	<input type="radio"/> 40	<input type="radio"/> 45	<input type="radio"/> 50	<input type="radio"/> 55	<input type="radio"/> 60	<input type="radio"/> 65	<input type="radio"/> 70	<input type="radio"/> 75
<input type="radio"/> 80	<input type="radio"/> 85	<input type="radio"/> 90	<input type="radio"/> 95	<input type="radio"/> 100	<input type="radio"/> 105	<input type="radio"/> 110	<input type="radio"/> 115	<input type="radio"/> 120	<input type="radio"/> 110	<input type="radio"/> 115	<input type="radio"/> 120						

Figura 12. Dimensiones de columna perfil rectangular.

Fuente: (CYPE Cad. Generador de precios Ecuador, 2018)

Para el siguiente criterio se toma a consideración el sistema de encofrado, que es el proceso en el cual se dará la forma de la columna, sistema de encofrado reutilizable con láminas metálicas, con número de usos de 50 a 150, se toma de igual manera a consideración el desencofrante (agente desmoldeante para encofrados metálicos, fenólicos o de madera) con un rendimiento de 0.030 l/m^2 como se muestra en la figura 13.

Con sistema de encofrado

Altura libre de planta
 Hasta 3 m Entre 3 y 4 m Entre 4 y 5 m

Columna
 Acabado del hormigón
 Para revestir

Sistema de encofrado
 Superficie encofrante
 Reutilizable
 Láminas metálicas
 Paneles metálicos
 Número de usos

Estructura soporte vertical
 Puntales
 Número de usos

Desencofrante
 Agente desmoldeante para encofrados metálicos, fenólicos o de madera
 Rendimiento (l/m²)

Figura 13. Criterios de encofrado y desencofrante.

Fuente: (CYPE Cad. Generador de precios Ecuador, 2018)

Para los criterios de hormigón, se tomó como hormigón premezclado en planta con la utilización de bomba con lo que respecta al vaciado. Para la clase de exposición ambiental se trabaja acorde con la normativa NEC-11 y ACI 318, la resistencia del concreto será de 210 kg/cm^2 con una consistencia fluida, estos parámetros se ilustran en la figura 14.

Hormigón Acero Separadores

Hormigón preparado en obra Hormigón premezclado en planta

Vaciado
 Con medios manuales
 Con grúa
 Con bomba

Clase de exposición ambiental, según NEC-11 y ACI 318
 Ciclos de congelamiento y deshielo
 F0 F1 F2 F3

En contacto con suelos o aguas con sulfatos solubles
 S0 S1 S2 S3

Requiere baja permeabilidad
 P0 P1

Protección adicional contra la corrosión
 C0 C1 C2

Resistencia (kg/cm²)
 170 210 240
 280 310 350
 400

Tamaño máximo del agregado (mm)
 12,5 19 25

Consistencia
 Fluida Blanda

Con aditivo hidrófugo
 No Sí

Excesos sobre volumen teórico de hormigón (%)

Figura 14. Criterios para hormigón.

Fuente: (CYPE Cad. Generador de precios Ecuador, 2018)

Para criterios de acero, el tipo de acero que se usa en Ecuador para la elaboración de columnas de hormigón armado es de grado 60, con esfuerzo de fluencia

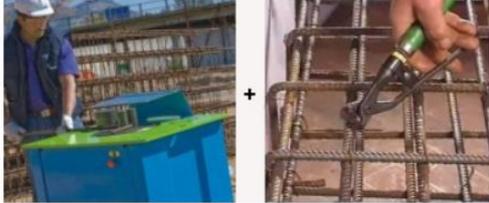
$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ como denota la figura 15. La cuantía puede variar acorde de las dimensiones de la columna.

Acero **Separadores**

Cuantía de acero (kg/m³) 120

Figurado del acero (corte y doblado) y armado

- Figurado del acero (corte y doblado) en el taller de fabricación, en obra, y armado en el lugar definitivo de su colocación en obra



Tipo de acero

- Grado 60 ($f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$)
- Grado 75 ($f_y=5250 \text{ kg/cm}^2$)
- Grado 40 ($f_y=2800 \text{ kg/cm}^2$)



Despunte y mermas de acero (%) 5

Figura 15. Criterios para el acero en columna de hormigón armado.

Fuente: (CYPE Cad. Generador de precios Ecuador, 2018)

Usualmente para la separación del mallado para la armadura metálica de la columna, se utilizan separadores homologados de plástico. En la figura 16, se puede evidenciar la forma y el uso de estos.

Separadores

Material De plástico

Separadores de armaduras




Repercusión de separadores (nº de separadores/m²) 12

Figura 16. Separadores de plástico para armadura.

Fuente: (CYPE Cad. Generador de precios Ecuador, 2018)

A continuación, en la figura 17, se presenta detalladamente la cantidad y costos para la elaboración de una columna de hormigón armado, tomando cuenta todos los parámetros dando como resultado un costo total de **438.70 dólares**.

El resumen de los criterios seleccionados es el siguiente; Columna de sección rectangular o cuadrada de hormigón armado, de 20x25 cm de sección media, realizada con hormigón $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ (21 MPa), clase de exposición F0 S0 P0 C0, tamaño máximo del agregado 19 mm, consistencia fluida, premezclado en planta, y vaciado con bomba, y acero Grado 60 ($f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$), con una cuantía aproximada de 120 kg/m^3 ; montaje y desmontaje de sistema de encofrado, con acabado para revestir, en planta de hasta 3 m de altura libre, formado por: superficie encofrante de láminas metálicas, amortizables en 50 usos y estructura soporte vertical de puntales metálicos, amortizables en 150 usos. Incluso berenjenos, alambre de atar, separadores y líquido desencofrante para evitar la adherencia del hormigón al encofrado. El precio incluye el figurado del acero (corte y doblado) en el taller de fabricación, en obra y el armado en el lugar definitivo de su colocación en obra.

Rubro	Unidad	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
1 Materiales					
mt07sep010ac	Ud	Separador homologado de plástico para armaduras de columnas de varios diámetros.	12,000	0,07	0,84
mt07aco060d	kg	Acero en barras corrugadas, Grado 60 ($f_y=4200 \text{ kg/cm}^2$), de varios diámetros, según NTE-INEN-2167 y ASTM A 706.	126,000	1,27	160,02
mt08var050	kg	Alambre galvanizado para atar, de 1,30 mm de diámetro.	0,840	1,18	0,99
mt08sup010b	m ²	Lámina metálica de 50x50 cm, para encofrado de columnas de hormigón armado de sección rectangular o cuadrada, de hasta 3 m de altura, incluso accesorios de montaje.	0,432	51,48	22,24
mt05spa081a	Ud	Puntal metálico telescópico, de hasta 3 m de altura.	0,133	17,21	2,29
mt08var040a	Ud	Berenjeno de PVC, de varias dimensiones y 2500 mm de longitud.	32,000	0,38	12,16
mt08dba010d	l	Agente desmoldeante, a base de aceites especiales, emulsionable en agua para encofrados metálicos, fenólicos o de madera.	0,540	2,35	1,27
mt10hat050abg	m ³	Hormigón $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ (21 MPa), clase de exposición F0 S0 P0 C0, tamaño máximo del agregado 19 mm, consistencia fluida, premezclado en planta, según NEC-11 y ACI 318.	1,050	90,99	95,54
			Subtotal materiales:		296,35
2 Equipo y maquinaria					
mq06bhe010	h	Camión bomba estacionado en obra, para bombeo de hormigón.	0,158	167,21	26,42
			Subtotal equipo y maquinaria:		26,42
3 Mano de obra					
mo044	h	Encofrador.	7,185	7,48	53,74
mo091	h	Ayudante encofrador.	8,211	4,78	39,25
mo043	h	Fierro.	0,965	7,48	7,23
mo090	h	Ayudante fierro.	1,073	4,78	5,13
mo045	h	Maestro de estructura mayor, en el proceso de hormigonado.	0,112	7,48	0,84
mo092	h	Ayudante estructurista, en el proceso de hormigonado.	0,447	4,78	2,14
			Subtotal mano de obra:		108,33
4 Herramienta menor					
	%	Herramienta menor	2,000	430,10	8,60
			Costos directos (1+2+3+4):		438,70

Figura 17. Rubros para columna de hormigón armado.

Fuente: (CYPE Cad. Generador de precios Ecuador, 2018)

Criterios de selección

Para el presente proyecto se ha definido la selección de un material alterno a una columna de hormigón, al ser un elemento estructural y definiendo que una columna estará sometida principalmente a esfuerzos de compresión. Se trabajará con índices de

rendimiento acorde a costo y huella de CO2 mínima para trabajar acorde a diseño sostenible con las ecuaciones 1 y 2 obtenidas de CES Edupack 2019, “Aprende en línea”, obtenidas de las figuras 18 y 19 respectivamente.

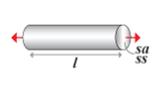
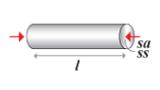
FUNCTION AND CONSTRAINTS		MAXIMIZE ¹	MINIMIZE ¹
Tie in tension		$E / C_m \rho$	$C_m \rho / E$
Column in compression		length, section shape fixed; section area free	$E / C_m \rho$
		length fixed; section area and section shape free	$(E\phi) / C_m \rho$
		length, section shape fixed; section area free; buckling stiffness limited	$E^{1/2} / C_m \rho$

Figura 18. Índices de rendimiento, minimizar coste.

Fuente: (CES Edupack , 2019)

Diseño de rigidez limitada a un costo mínimo.

$$\frac{C_m \times \rho}{\sigma_c} \tag{1}$$

Donde:

$C_m \rightarrow$ Costo por unidad USD/Kg.

$\rho \rightarrow$ densidad del material.

$\sigma_c \rightarrow$ Esfuerzo de compresión.

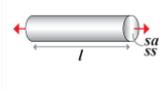
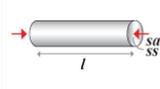
FUNCTION AND CONSTRAINTS		MAXIMIZE ¹	MINIMIZE ¹
Tie in tension		$E / CO_2 \rho$	$CO_2 \rho / E$
Column in compression		length, section shape fixed; section area free	$E / CO_2 \rho$
		length fixed; section area and section shape free	$(E\phi) / CO_2 \rho$
		length, section shape fixed; section area free; buckling stiffness limited	$E^{1/2} / CO_2 \rho$

Figura 19. Índice de rendimiento, impacto ambiental mínimo.

Fuente: (CES Edupack , 2019)

Diseño de rigidez limitada a un impacto ambiental mínimo.

$$\frac{CO_2 \times \rho}{\sigma_c} \quad (2)$$

Donde:

CO_2 → Huella de dióxido de carbono.

ρ → densidad del material.

σ_c → Esfuerzo de compresión.

Se determinó que una columna estructural es una parte fundamental ya sea de vivienda, edificio o aplicaciones industriales. Es un elemento encargado de transmitir cargas al suelo y es un pilar fundamental para tener erguida la estructura por lo que los criterios a considerarse se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Criterios para el diseño.

PROPIEDADES	CARACTERÍSTICA	CRITERIO
Costo	USD/Kg	Mínimo
Físicas	Densidad Kg/m ³	Mínimo
	Módulo de Young (Gpa)	Máximo
Mecánicas	Resistencia a la tracción (Mpa)	Máximo
	Resistencia a la compresión (Mpa)	Máximo
	Coefficiente de poisson	Máximo
	Límite de fluencia (Mpa)	Máximo
	Módulo de cortante (Gpa)	Máximo
Ecológicas	Reciclabilidad	SI
	Biodegradabilidad	SI
	Huella de CO ₂ , producción primaria (Kg/Kg)	Mínimo

Módulo de Young

Para una columna estructural, el módulo de Young debe ser considerado como un factor alto. El concreto por si solo tiene un bajo módulo de Young bajo y para alcanzar valores altos se adhiere acero.

Densidad

Este parámetro indica el peso por metro cubico del material, el concreto tiene una densidad muy alta, se busca un material más liviano para su reemplazo.

Resistencia a la tracción

La resistencia a la tracción del hormigón es mucho menor en comparación a la resistencia a la compresión, en torno a un 10%, y limita en muchos casos el uso de este material.

Resistencia a la compresión

Es la característica principal del concreto, se define como la capacidad de soportar carga por unidad de área, esta característica debe ser tomada en cuenta como máxima ya que es aplicado, en este caso, para columnas estructurales.

Coefficiente de Poisson

Relaciona la deformación longitudinal con la deformación transversal. Se busca materiales alternativos con un coeficiente similar al del concreto.

Límite de fluencia

Es la deformación irre recuperable del material antes de llegar a su zona plástica, es decir, capacidad del material para retomar su forma original (cuando el material se comporta elásticamente). El concreto posee la característica de ser un material poco elástico, se busca un material con altas capacidades elásticas para su reemplazo.

Módulo de cortante

Es aquella que, fijado en un plano, actúa de forma tangencial a este. En piezas alargadas como vigas o columnas, el plano de referencia suele ser paralelo a la sección transversal, en columnas el módulo de cortante debe considerarse como alto ya que es utilizado en el diseño sísmico. En la figura 20, se aprecia este efecto en una columna, donde F se representa como la fuerza producida por periodos de un sismo.

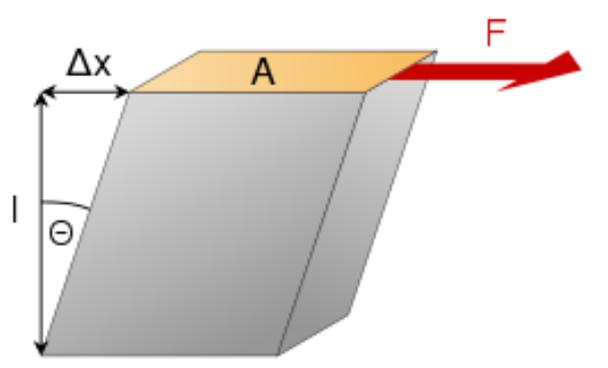


Figura 20. Esquema de esfuerzo cortante en columna.

Precio

El precio del material debe ser lo más bajo posible para que pueda ser rentable en su aplicación en el medio.

Los criterios de selección para un material alternativo al uso de concreto en viviendas de interés social VIS, dependerán de su aplicación

Reciclabilidad

La reciclabilidad de un material al llegar al fin de su vida útil es un tema de importancia en cuanto a la reutilización y reincorporación de materiales al entorno. Pueden resolver muchos de los problemas creados por la forma de vida cotidiana. Se puede salvar grandes cantidades de recursos naturales no renovables cuando en los procesos de producción se pueden utilizar materiales reciclados como valor agregado. Es por esto que dicho criterio o parámetro hoy en día se lo debe tomar muy en cuenta al momento de la selección de materiales.

Huella de CO₂

Uno de los principales contaminantes a nivel mundial es la proliferación del dióxido de carbono en el ambiente producto de la elaboración de productos por las grandes industrias. Se debe tomar en cuenta la huella de CO₂ causado por la elaboración primaria de los productos como mínima para poder mitigar el impacto ambiental que genera. Este criterio en conjunto con la reciclabilidad de productos disminuye el

consumo de energía. Cuando se consuma menos combustibles fósiles, se genera menos CO₂, por lo tanto, se reducirá el efecto invernadero.

Biodegradabilidad

Cualquier material en el mundo tiene un tiempo determinado de degradación. La biodegradabilidad es el proceso por el cual ciertos materiales dependiendo de su composición física y química, su descomposición será lenta reintegrándose a la tierra de manera ecológica y natural. Por esta razón, es recomendable la utilización de productos que sean biodegradables ya que brindan seguridad y bienestar al planeta. Al no producir residuos tóxicos o químicos en su descomposición ayuda a no contribuir con la contaminación y efectos invernaderos.

Selección de materiales CES Edupack nivel 3 (Eco Design)

En la tabla 3, se detalla las propiedades físicas y mecánicas del material base (hormigón), donde sus distintas propiedades fueron obtenidas mediante el software CES Edupack 2019. Dado que algunas propiedades varían con un mínimo y máximo, se realizó un promedio entre dos valores para obtener un rango intermedio en la toma de decisiones, con respecto al precio se consideró el valor obtenido mediante CYPE Cad, generador de precios Ecuador, como se detalla en la figura 17, el costo total de fabricación de una columna de hormigón armado es de 438.70 USD.

Tabla 3. Propiedades físicas y mecánicas del hormigón (portland)

PROPIEDADES	CARACTERISTICA	VALOR
Costo	USD	438,70
Físicas	Densidad Kg/m ³	2400
	Módulo de Young (Gpa)	20
Mecánicas	Resistencia a la tracción (Mpa)	1,2
	Resistencia a la compresión (Mpa)	30
	Coefficiente de poisson	0,3

	Límite de fluencia (Mpa)	1,2
	Módulo de cortante (Gpa)	17,4
Ecológicas	Reciclabilidad	SI
	Biodegradabilidad	NO
	Huella de CO ₂ , producción primaria (Kg/Kg)	0.244

Para la selección de materiales mediante el software CES Edupack 2019, se toma a consideración en primer lugar la aplicación del material que será en Viviendas de interés Social (VIS) de una sola planta que no requiere de mayores exigencias en cuanto a requerimientos mecánicos. Se considera paneles de tipo estructural si es la posibilidad, esto es una solución al proceso constructivo y una alternativa para el uso de hormigón en estructuras, de igual manera proporciona seguridad durante el proceso constructivo y ahorros significativos en tiempos de ejecución y montaje.

Para la selección preliminar de una serie de materiales disponibles en el software; CES Edupack tiene catalogado materiales en distintas bases de datos por niveles, se diferencian en materiales universales, bio-ingeniería, arquitectura, diseño ecológico. Para la selección del presente proyecto se escogerá el nivel 3, la sección de Eco-Design, como se muestra en la figura 21. Se escoge este nivel ya que se propone un diseño en términos de sostenibilidad.

Avanzado



Figura 21. selección de base de datos para el proyecto.

Dentro las herramientas del software existen varias opciones para delimitar la cantidad de materiales a considerar dentro de un numero finito de opciones, como primer paso en el apartado de Grafico/Seleccionador, en etapas de selección, todos los materiales, se toma a consideración registros de materiales que pasaran la selección como muestra la figura 22.

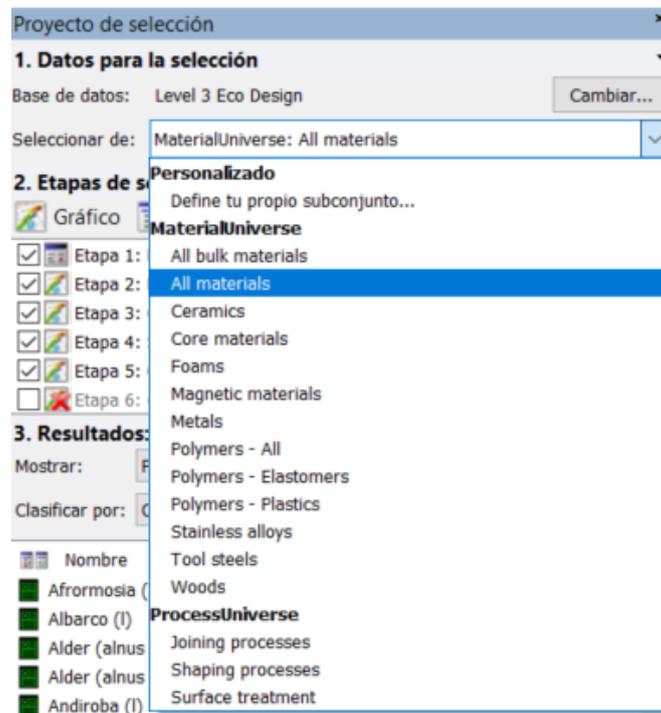


Figura 22. Registros de materiales para la selección.

Se tomo a consideración materiales híbridos compuestos de origen natural, de matriz de polímeros y termoplásticos sumando en total 1764 de 4026 materiales que pasan la selección.

Dentro de la opción limite en etapas de selección, precio y esfuerzo de compresión, se considera el costo máximo de 2 USD/Kg, un esfuerzo mínimo de compresión de 30 Mpa que será el esfuerzo máximo del hormigón, se toma como parámetro mínimo ya que, si existen materiales con un esfuerzo de compresión mayor, será mejor. Esto reduce el número de consideraciones de materiales siendo 204 de 4026 que pasan la selección. La figura 23 denota los parámetros utilizados.

▼ Price			
	Mínimo	Máximo	
Price	<input type="text"/>	2	USD/kg
Price per unit volume	<input type="text"/>	<input type="text"/>	USD/m ³
► Physical properties			
▼ Mechanical properties			
	Mínimo	Máximo	
Young's modulus	<input type="text"/>	<input type="text"/>	GPa
Specific stiffness	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MN.m/kg
Yield strength (elastic limit)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Tensile strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	MPa
Specific strength	<input type="text"/>	<input type="text"/>	kN.m/kg
Elongation	<input type="text"/>	<input type="text"/>	% strain
Compressive strength	30	<input type="text"/>	MPa

Figura 23. Parámetros de precio-esfuerzo de compresión.

La figura 24, detalla una figura de booleana, donde se toma parámetros de materiales que sean biodegradables vs materiales reciclables. Esto ayuda a tomar a consideración materiales biodegradables o reciclables para poder trabajar en términos de sostenibilidad dentro del proyecto. Se obtiene 135 materiales que son biodegradables, pero no reciclables, 4 materiales que son biodegradables y reciclables y 30 materiales que son reciclables, pero no biodegradables.

		Falso	Verdadero
Biodegrade	Verdadero	135	4
	Falso	35	30
		Falso	Verdadero
		Recycle	

Figura 24. Materiales biodegradables vs reciclables.

Se trabajará con índices de rendimiento con un diseño de rigidez limitada a un costo mínimo y con un diseño de rigidez limitada con un impacto ambiental mínimo

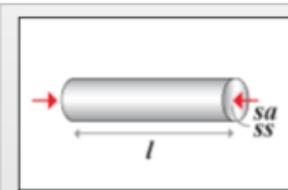
con la aplicación de las ecuaciones 1 y 2 como muestra la figura 25 y 26 respectivamente, de esta manera se podrá realizar un gráfico donde denote todos los materiales con un costo e impacto ambiental mínimo.

Configuración de la etapa Eje X Eje Y

Propiedad individual o avanzada Buscador de índice de rendimiento [¿Qué es un índice de rendimiento?](#)

Definición de componentes

Función y carga:



Column in compression

Notas del componente:
Columns, pillars, poles, pylons, legs, compression struts...
l - length
sa - section area
ss - section shape

Variables libres: section area

Variables fijas: length, section shape

Restricción limitante: strength

Optimizar: CO2 footprint

Índice de rendimiento
Minimizar:

$$\frac{CO_2 \cdot \rho}{\sigma_c}$$

[símbolos](#)

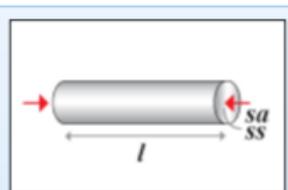
Figura 25. Rigidez limitada minimizando la huella de CO2

Configuración de la etapa Eje X Eje Y

Propiedad individual o avanzada Buscador de índice de rendimiento [¿Qué es un índice de rendimiento?](#)

Definición de componentes

Función y carga:



Column in compression

Notas del componente:
Columns, pillars, poles, pylons, legs, compression struts...
l - length
sa - section area
ss - section shape

Variables libres: section area

Variables fijas: length, section shape

Restricción limitante: strength

Optimizar: cost

Índice de rendimiento
Minimizar:

$$\frac{C_m \cdot \rho}{\sigma_c}$$

[símbolos](#)

Figura 26. Rigidez limitada minimizando costos

La figura 27 muestra el gráfico obtenido mediante la aplicación de las ecuaciones 1 y 2 con índices de rendimiento de rigidez limitada a un costo e impacto ambiental mínimo.

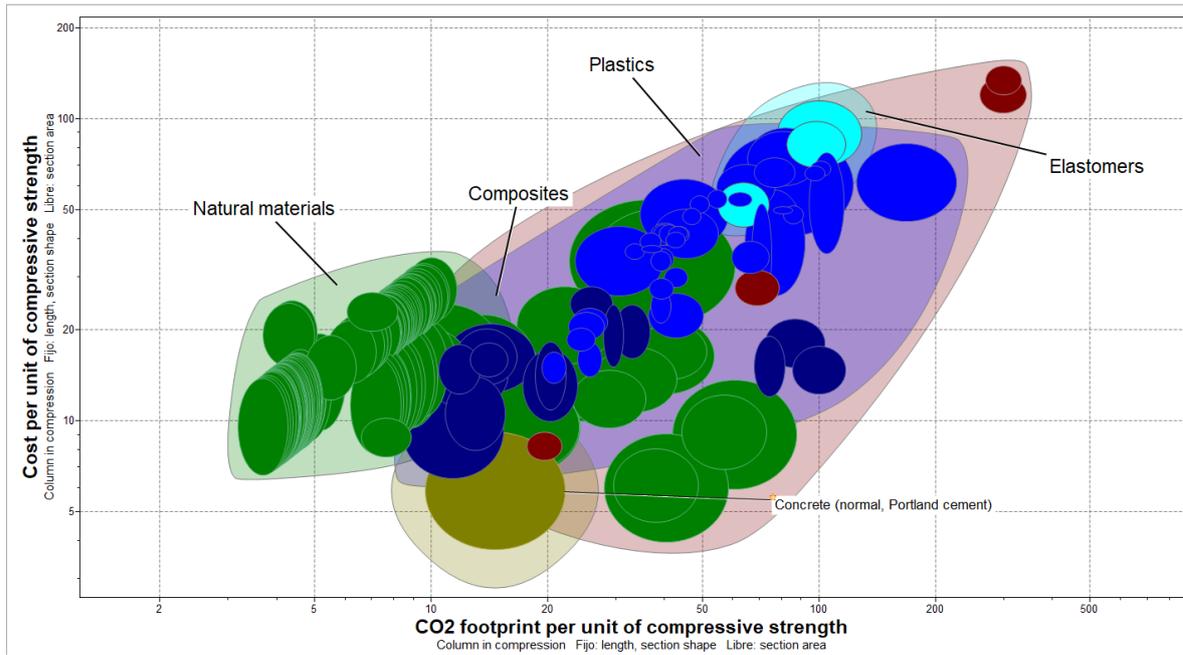


Figura 27. Diseño de resistencia limitada con costo y huella de CO2 minimizada.

La presente grafica representa los resultados de 204 de 4026 materiales obtenidos, se escogerá los materiales en un rango de 20 para el eje Y hasta 20 en el eje X, realizando una pendiente igual a 1 para minimizar los índices, esto se realiza para poder eliminar materiales que estén por encima de estos valores comparándolos con el material base a reemplazar (concreto portland) como se muestra en la figura 28.

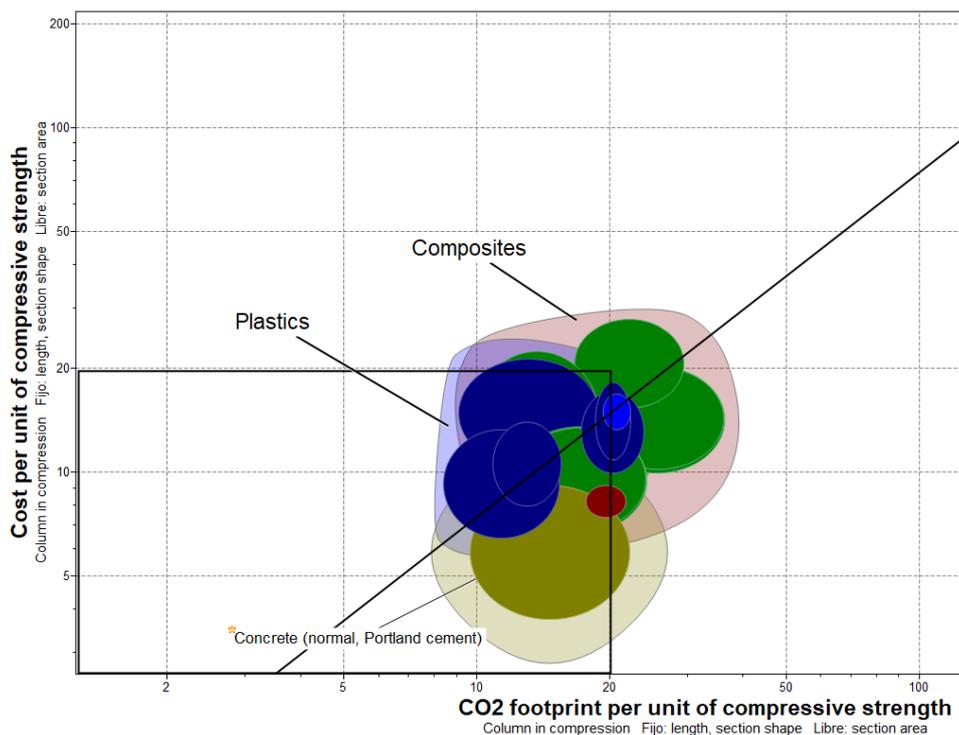


Figura 28. Eliminación de materiales por debajo de los índices más altos en comparación al concreto.

De esta manera se obtienen 14 de 4026 materiales para selección, la figura 29y 30 muestra los resultados de 4 materiales que son biodegradables y dos materiales que son reciclables y biodegradables donde serán los seleccionados para trabajar con los métodos multicriterio para poder determinar el mejor para ser reemplazado al material base de concreto portland. No se toma en cuenta el material reciclable que es el concreto, se eliminan los 7 materiales que no cumplen con términos de sostenibilidad ya que no son biodegradables ni reciclables.

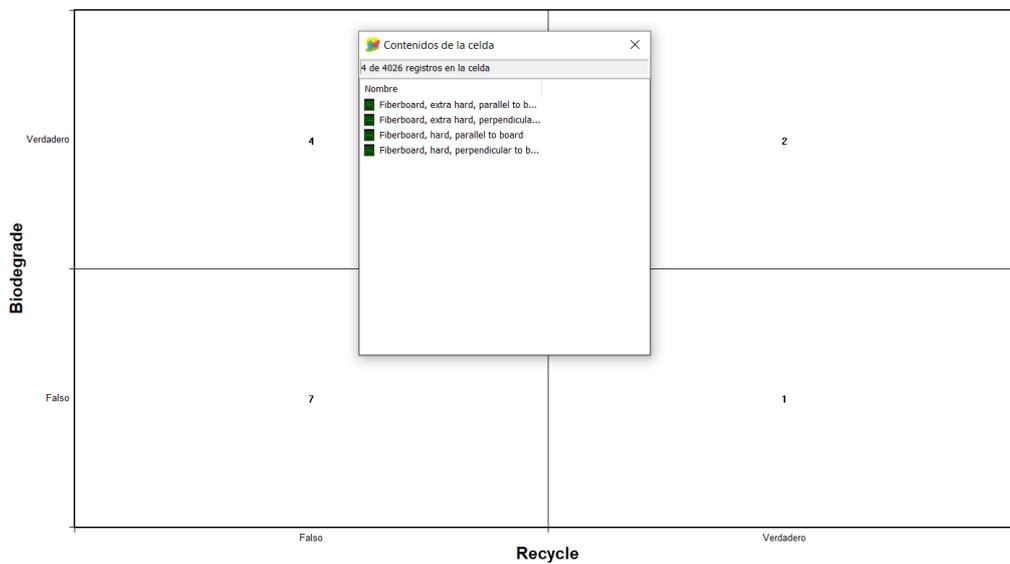


Figura 29. Materiales biodegradables.

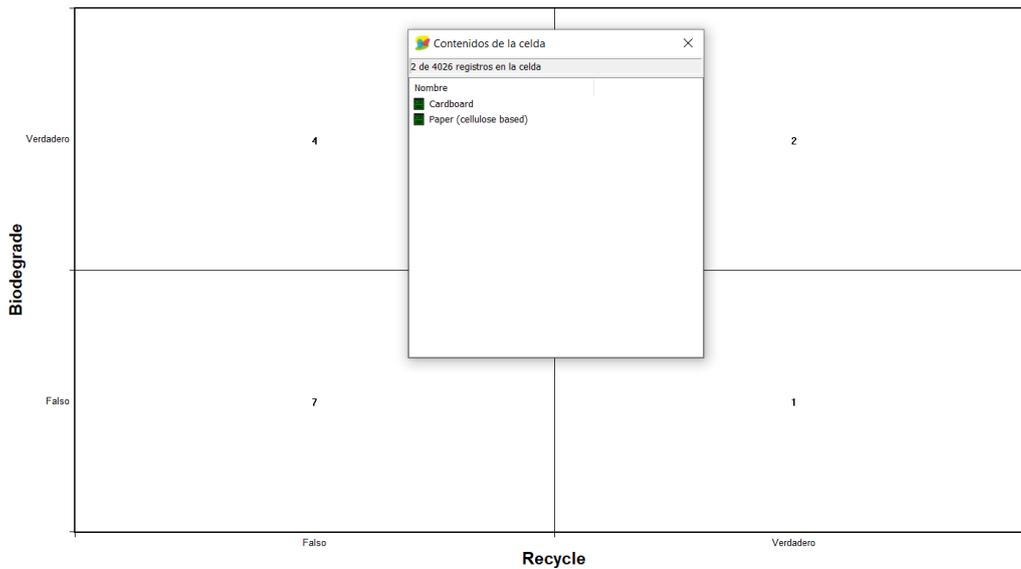


Figura 30. Materiales reciclables.

Selección de materiales CES Edupack nivel 2 (Arquitectura)

Realizando otro análisis en nivel 2, arquitectura, seleccionando materiales utilizados en superestructuras dentro del software CES Edupack, se toma a consideración el bambú que destaca entre los otros tres materiales que de igual manera serán tomados a consideración por su aplicación en la construcción. Se realiza el mismo análisis anterior en este nivel 2 del software se obtiene como resultados materiales naturales. Se tiene que el bambú obtiene los valores más bajos con respecto a huella de CO2 y costo como muestra la figura 31.

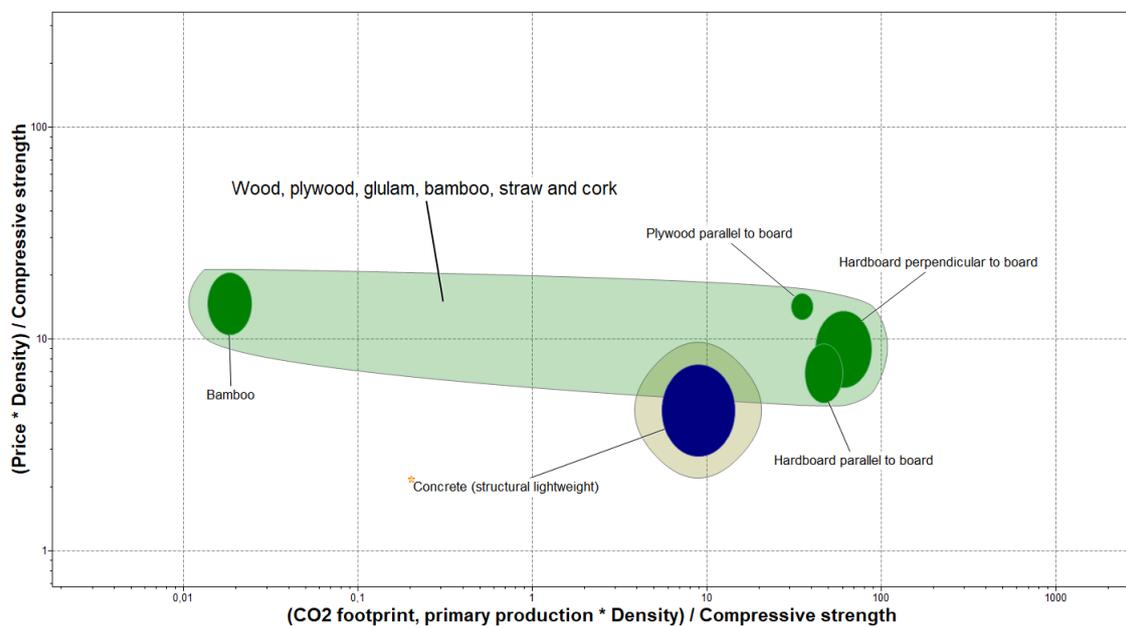


Figura 31. Analisis nivel 2, materiales para superestructuras.

A continuación, se detalla las características de los 10 materiales seleccionados a través del software CES Edupack mediante la aplicación de índices de rendimiento. Estos materiales serán evaluados para uso alternos de una columna de hormigón, considerando que el uso de un material debe tener propiedades similares o mejores al del material base con términos de calidad que garantice una vida útil de su uso.

La tabla 4, detalla los valores de las distintas propiedades físicas y mecánicas de los distintos materiales obtenidos mediante el software CES Edupack con la aplicación de índices de rendimiento con la aplicación de las ecuaciones 1 y 2. Se ha realizado una codificación a cada uno de los materiales de la siguiente manera:

- M1. Tablero de fibra de madera extraduro, paralelo al tablero.
- M2. Tablero de fibra de madera extraduro, perpendicular al tablero.
- M3. Tablero de fibra de madera dura, paralelo al tablero.
- M4. Tablero de fibra de madera dura, perpendicular al tablero.
- M5. Tablero de cartulina prensada.
- M6. Tablero de papel a base de celulosa.
- M7. Bambú.
- M8. Panel de madera dura, paralelo al tablero.
- M9. Panel de madera dura, perpendicular al tablero.
- M10. Panel de madera Plywood.
- M11. Hormigón (portland)

Tabla 4. Propiedades de los materiales candidatos.

VARIABLES		PROPIEDADES										
PROPIEDADES	CARACTERISTICAS	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10	M11
Costo	USD/Kg	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	1,1	1,67	0,28	0,28	0,58	438
Físicas	Densidad Kg/m^3	1000	1000	900	850	850	925	700	902,5	902,5	750	$2,4e^3$
	Módulo de Young (Gpa)	8,65	5,4	6,05	3,8	3,8	3	17,5	2,95	0,75	9,95	20
	Resistencia a la tracción (Mpa)	45	37,5	36	30	30	24,5	239,5	18	0,8	19	1,2
Mecánicas	Resistencia a la compresión (Mpa)	45	30	39,7	26,5	26,5	48	80	37,5	30	30,5	30
	Coefficiente de poisson	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,45	0,46	0,3	0,3	0,3	0,3
	Límite de fluencia (Mpa)	27	34	21,6	26,5	26,5	24,5	40	15	0,7	15,5	1,2
	Módulo de cortante (Gpa)	0,2	1	0,2	1	1	1,5	1,08	0,5	1,15	2,04	17,4
Ecológicas	Reciclabilidad	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No	No	Si
	Biodegradabilidad	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	No
	Huella de CO ₂ , producción primaria (Kg)	1.52	1.51	1.52	1.52	2.0	2.34	0.004	3.75	3.75	2.73	0.24

La masa equivalente de CO₂ de gases de efecto invernadero (Kg/ CO₂), en Kg, producida y liberada a la atmosfera como consecuencia de la producción de un 1 Kg del material. La “potencia” de estos gases puede variar significativamente desde la perspectiva del calentamiento global y, por lo tanto, es convencional informar sobre estas emisiones en términos de masa equivalente.

Los materiales M8, M9 y M10, si bien no son materiales reciclables, son materiales considerados como recursos renovables que significa que el material se extrae de un recurso que puede ser reemplazado. Por lo tanto, los productos a base de madera, el papel y la paja se enumeran como renovables.

Para poder llevar a cabo de una manera eficiente el análisis con respecto a la toma de decisiones, se recomienda seguir 4 pasos que son importantes para poder realizar el análisis de una manera ordenada.

1. Matriz de decisión. En esta fase se deberá construir una matriz en el que detalle las diferentes opciones y criterios con los valores respectivos de selección.
2. Ponderación de pesos. En esta fase existen diferentes criterios que pueden ser objetivos y/o subjetivos. Para el presente análisis se trabaja con métodos objetivos, que se basan en experiencia o juicio de la persona que llevara a cabo la toma de decisiones. Se detalla los métodos de: DESVIACIÓN ESTANDAR, ENTROPÍA y VARIACIÓN ESTADÍSTICA. Al final del análisis se tomará el resultado de uno de ellos para trabajar con los MCDM.
3. Aplicación de métodos multicriterio (MCDM). En esta fase se toma a consideración los métodos a elección por parte del criterio de la persona o decisor, por lo que se ha llegado a la conclusión de utilizar

los métodos: TOPSIS, VIKOR, COPRAS Y DOMINIC, donde se obtendrá resultados cuantitativos para posicionar cada material seleccionado según sus características.

4. Ranking. Es la posición para ocupar con respecto a los resultados obtenidos por la ampliación de métodos multicriterio, otorgando una escala de menor a mayor.

Ponderación de pesos

En esta etapa se emplean los métodos de DESVIACIÓN ESTANDAR, ENTROPÍA y VARIACIÓN ESTADÍSTICA, que estarán en función de las distintas variables asociadas a cada material que será candidato para ser una opción alterna a una columna de hormigón. Se toma varios aspectos con respecto a las propiedades físicas y mecánicas tomadas del software CES Edupack Granta Design.

Método de Entropía

Como señala (Estrada García, 2002) el método de entropía básicamente está relacionado directamente con la incertidumbre² que se genera ensayo o indicador aleatorio, de tal manera que se pueda entender la cantidad de datos que se pueda obtener de un indicador. De igual manera señala, que la entropía mide el grado de caos o desorden que posee un sistema.

Este método se calcula por medio de los siguientes pasos:

1. Construcción de matriz de decisión. Esta será nombrada (X), se construye a partir de la asociación de dos variables que son: materiales candidatos (M) en las columnas (M1, M2, M3...) y los criterios (C) en las filas (C1, C2, C3...), estos valores de los diferentes criterios pueden variar respecto a la característica de cada material.

² Falta de seguridad, de confianza o de certeza sobre algo, especialmente cuando crea inquietud.

$$X = \begin{bmatrix} C_{1M1} & C_{2M1} & \cdots & C_{1n} \\ C_{1M2} & C_{2M2} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \cdots & C_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde los valores de **CM** serán luego reconocidos como **Xij**.

2. Cálculo de matriz de decisión normalizada **Pij**, el objetivo del análisis y normalización es obtener valores de la matriz sin dimensiones de diferentes criterios para poder realizar comparaciones entre ellos. (Jahan et al., 2012)

Para ellos se calcula con la ecuación (3):

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} m \quad (3)$$

Donde:

p_{ij} → Son los valores resultantes.

m → Es la cantidad de criterios.

x_{ij} → Valores de matriz de desicion.

Se consigue la matriz normalizada a partir de los valores ordenados obtenidos de la matriz anterior.

$$X = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p & p_{m2} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix}$$

3. Cálculo de la entropía. Se calcula el valor de la entropía E_j mediante la ecuación (4) y (5):

$$E_j = -k(\sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij})) \quad (4)$$

$$k = \frac{1}{\ln m} = \frac{1}{\ln 7} = 0.514 \quad (5)$$

Donde:

k: $\frac{1}{\ln}$ → constante correspondiente a valor establecido $0 \leq e_j \leq 1$

m → Son la cantidad o numero de materiales.

e_j → Es el valor de la entropía.

p_{ij} → Son valores de la matriz normalizada.

\ln → Logaritmo natural.

4. Nivel de divergencia D_j , se calcula la diversidad de los valores, es decir, cada uno de los criterios tiene información relativa que se aclara aplicando la ecuación (6):

$$D_j = 1 - E_j \quad (6)$$

Donde:

D_j → Es el grado de divergencia.

E_j → Es el valor de la entropía.

Calculo y obtención de pesos normalizados de cada criterio W_j , mediante la ecuación

(7):

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^m D_j} \quad (7)$$

Donde:

W_j → Es la obtencion de pesos de cada criterio.

$\sum D_j$ → Es la sumatoria de los grados de divergencia.

Método de desviación estándar

Es un método estadístico que facilita la identificación de variaciones dentro de un sistema o universo determinado de valores, considerando como una evaluación donde identifica el promedio de la dispersión de datos respecto a un punto central o media, esta desviación identifica un valor próximo a la posición de valores a evaluar. (Andrade Pesantez, A. E., 2019). Esto quiere que, en la aplicación de este método, priorizará pesos, a mayor peso a la cualidad que más incida en el proyecto será el utilizado para la valoración en los métodos multicriterio siguiendo los siguientes pasos:

1. Construcción de matriz de decisión. Para este caso se usará la misma matriz descrita en el método de entropía.
2. Cálculo de la desviación estándar. Se procede con el cálculo de los valores dispersos que estarán en función de valores promedios por medio de la ecuación (8):

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2}{m}} \quad (8)$$

Donde:

x_{ij} → Son los valores de la matriz de decisión.

m → Son la cantidad o numero de materiales.

σ_j → Son valores de la desviacion estandar.

\bar{x}_j → valor de la sumatoria de criterios dividido para m .

3. Obtención de pesos para criterios mediante la ecuación (9):

$$W_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \quad (9)$$

Donde:

W_j → Es el peso de cada criterio.

$\sum_{j=1}^n \sigma_j$ → Es la sumatoria de los valores de la desviacion estandar.

Método de variación estadística

Es un tipo de método estadístico de tipo objetivo, que ayuda a juntar todas las variables de una matriz de decisión que se encuentre preestablecida dentro de un universo determinado de valores, este los concatena uno con otro de una manera numérica con el fin de buscar el valor más acertado a uno ideal. De esta manera se asigna un mayor peso a un criterio que numéricamente sea más alto. (Portilla Hernández, J. E. 2019)

Los pasos para seguir en la aplicación de este método son los siguientes:

1. Construcción de una matriz de decisión. Se utiliza la misma matriz que en el método de entropía.
2. Normalización de matriz de decisión. Se toma en cuenta valores de la matriz del método de la entropía mediante la ecuación (10):

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (10)$$

Donde:

p_{ij} → Son los valores de la matriz normalizada.

m → Pertenece al numero de evaluaciones de los criterios.

x_{ij} → Son valores de la matriz de desicion.

Para poder normalizar la matriz, a los valores obtenidos se debe aplicar las ecuaciones (11) y (12) utilizando valores máximos y mínimos respectivamente.

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_{ijmax}} \quad (11)$$

$$p_{ij} = \frac{x_{ijmin}}{x_{ij}} \quad (12)$$

3. Cálculo de variación estadística. Viene a ser el valor promedio de todas las iteraciones de cada criterio, para la aplicación de esto se utiliza la ecuación (13):

$$V_j = \frac{\sum_{i=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_j)^2}{m} \quad (13)$$

Donde:

p_{ij} → Son los valores de la matriz normalizada.

m → Pertenece al numero de materiales evaluados.

V_j → Valor de la variacion estadistica.

p_j → Corresponde a la sumatoria de p_{ij} .

4. Obtención de pesos W_j para cada criterio, se da la valoración que este método plantea para cada uno de los criterios mediante la ecuación (14):

$$W_j = \frac{v_j}{\sum_{j=1}^m v_j} \quad (14)$$

Métodos multicriterio MCDM

Método VIKOR

Este proceso es utilizado cuando existe la inseguridad de posición de prioridades, su proceso a seguir es el siguiente:

1. Construcción de matriz de decisión inicial, se utilizará la misma matriz del método de la entropía.
2. Normalización de la matriz de decisión, se usan los valores de la matriz de decisión inicial mediante la ecuación (15):

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a^2_{ij}}} \quad (15)$$

Donde:

a_{ij} → Valores pertenecientes a la matriz de decisión.

r_{ij} → Valores pertenecientes a la matriz normalizada.

$\sum_{i=1}^m a^2_{ij}$ → Corresponde a la sumatoria de los valores elevadas al cuadrado.

Se obtiene una matriz normalizada R_{ij} con valores ordenados.

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

3. Construcción de matriz estandarizada de pesos V_{ij} , se obtiene mediante la multiplicación de los valores de la matriz normalizada por los pesos, se obtiene mediante la ecuación (16)

$$V = (wr) \quad (16)$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots & w_n r_{mn} \end{bmatrix}$$

Donde:

w_n → Corresponde al valor de los pesos para cada uno de los criterios.

r → Corresponde a los valores de la matriz normalizada.

V_{ij} → Corresponde a los valores de la matriz normalizada.

4. Cálculo de valores máximos y mínimos de la matriz estandarizada de pesos mediante las ecuaciones (17) y (18) respectivamente:

$$A^* = \left\{ \max_i f_{ij} \mid j \in J, (\min_i f_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{f_1^{max}, f_2^{max}, \dots, f_n^{max}\} \quad (17)$$

$$A^- = \left\{ \max_i f_{ij} \mid j \in J, (\min_i f_{ij} \mid j \in J') \right\} = \{f_1^{min}, f_2^{min}, \dots, f_n^{min}\} \quad (18)$$

Donde:

A^* → Resultado de la operacion del criterio positivo.

A^- → Resultado de la operacion del criterio negativo.

5. Cálculo de soluciones optimas U_i . Establece valores para poder determinar un rango de valores de cada criterio mediante las ecuaciones (19), (20) y (21) respectivamente:

$$U_i = \sum_{j=1}^n \frac{W_f(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \quad (19)$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{W_f(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \right] \quad (20)$$

$$V_i = \frac{\alpha(U_i - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})} + \frac{(1-\alpha)(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \quad (21)$$

Donde:

U_i → Matriz resultante de la sumatoria.

W_f → Valores de los resultados de los pesos.

$F_j \rightarrow$ Valores de la matriz estandarizada de pesos.

$R_i \rightarrow$ Matriz de valores correspondiente a los rangos.

$v_i \rightarrow$

Valores finales de cada criterio de soluciones optimas.

$\alpha \rightarrow$ Corresponde al valor de una constante igual a 0,11.

6. Ranking. Es la ubicación correspondiente de los valores obtenidos obteniendo un valor de secuencia ascendente que va de 1 a 7, siendo 1 el valor idóneo cercano a cero, de manera que este método VIKOR considera que es el óptimo.

Método TOPSIS

Se basa en la obtención de soluciones artificiales indicaran en que posición se encuentra cada valor acorde con los criterios a obtener hasta los criterios menos deseados en el que se tiene el siguiente procedimiento:

1. Desarrollo de una matriz de decisión, se usa la misma matriz del método de Entropía.
2. Normalización de matriz de decisión, se utiliza la misma matriz estandarizada del método VIKOR.
3. Establecer matriz de decisión normalizada, se utilizará la misma matriz estandariza de pesos del método VIKOR.
4. Definición de la solución ideal, se define mediante la ecuación (22) y (23):

$$A^+ = (v_1^+, \dots, v_n^+) = \left\{ \left(\max_j v_{ij} \mid i \in I^I \right) \left(\min_j v_{ij} \mid i \in I^{II} \right) \right\} \quad (22)$$

$$A^- = (v_1^-, \dots, v_n^-) = \left\{ \left(\min_j v_{ij} \mid i \in I^I \right) \left(\max_j v_{ij} \mid i \in I^{II} \right) \right\} \quad (23)$$

Donde:

$A^+ \rightarrow$ Corresponde a valores positivos ideales.

A^- → Corresponde a valores negativos ideales.

V → Valores de la matriz normalizada de pesos.

5. Cálculo de diferencias entre mediciones. Trata de calcular distancias promedio entre alternativas con la aplicación de las ecuaciones (24) y (25):

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (24)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (25)$$

Donde:

S_i^* → Corresponde a separaciones positivas.

S_i^- → Corresponde a separaciones negativas.

6. Proximidad relativa a la solución ideal C_j^+ . La cercanía con respecto a la solución ideal A^+ , se calcula con la ecuación (26):

$$C_i^+ = \frac{S_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (26)$$

Donde:

C_i^+ → Corresponde al coeficiente de proximidad relativa.

7. Ranking. Paso por el cual se seleccionará una alternativa de resultado mayor que otorgará un lugar en la escala, siendo el valor más alto que ocupa la primera opción.

Método DOMINIC

Para Martínez, el método DOMINIC es un “Método cualitativo de selección de materiales, que considera factores de peso en los criterios de selección. Se elabora con matrices, en las filas se incluirán criterios y factores de peso, en las columnas contendrán materiales candidatos, identificados con una letra” (2015, p. 116).

Su proceso sugiere lo siguientes pasos:

1. Elaboración de una matriz de decisión, se utiliza la matriz de decisión del método VIKOR.
2. Construcción de una matriz de ponderación. Se construye una matriz donde se otorga grados de prioridades donde se utiliza palabras acordes a un rango otorgado:

EXCELENTE=10

BUENO=7

RAZONABLE=5

POBRE=1

3. Normalización de matriz de ponderación. Se multiplica los valores de la matriz de ponderación por los pesos mediante la ecuación (27):

$$K = [M_{ij} * W_{ij}] \quad (27)$$

Donde:

$K \rightarrow$ Matriz normalizada.

$M_{ij} \rightarrow$ Valores en M de la matriz de ponderación.

$W_{ij} \rightarrow$ Peso de cada criterio.

4. Cálculo de valores finales V_i , se utiliza la ecuación (28):

$$V_i = \sum_i^n / n \quad (28)$$

Donde:

$V_i \rightarrow$ Corresponde a los valores finales de cada criterio.

$n \rightarrow$ Cantidad de criterios.

5. Ranking, donde el valor con un resultado más elevado ocupara la primera posición.

Método COPRAS

Este método selecciona las mejores alternativas de decisión, considera soluciones ideales, de igual manera considera soluciones no ideales, en una clasificación y evaluación paso a paso de las alternativas en términos de su importancia y el grado de su utilidad. (Martínez Gómez et al., 2018)

Este método consta de los siguientes pasos:

1. Construcción de una matriz de decisión mediante la matriz del método VIKOR.
2. Cálculo de la matriz de decisión normalizada mediante la ecuación

(29):

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (29)$$

Donde:

$r_{ij} \rightarrow$ Matriz de decisión normalizada.

$a_{ij} \rightarrow$ Corresponde al valor de cada criterio.

$\sum_{i=1}^m a_{ij} \rightarrow$ Sumatoria de los valores de cada criterio.

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots \\ r_{21} & r_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots \end{bmatrix}$$

3. Cálculo de matriz estandarizada de pesos mediante la ecuación (30):

$$V_{ij} = (W_i)(r_{ij}) \quad (30)$$

Donde:

$r_{ij} \rightarrow$ Matriz estandarizada de pesos.

$W_i \rightarrow$ Pesos de cada criterio.

$V_{ij} \rightarrow$ Valores de la matriz normalizada.

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \cdots \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \cdots \end{bmatrix}$$

4. Cálculo de pesos normalizados, se requiere proporcionar a cada criterio un peso según su característica comparándola con la característica buscada, se emplea las ecuaciones (31) y (32):

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^m Y + i \quad (31)$$

$$S_{-i} = V3 \quad (32)$$

Donde:

$S_{+i} \rightarrow$ Peso normalizado positivo.

$S_{-i} \rightarrow$ Peso normalizado negativo.

$\sum_{j=1}^m Y + i \rightarrow$ Sumatoria de pesos positivos de cada criterio.

$V3 \rightarrow$ Peso normalizado respecto al criterio de precio.

5. Prioridades relativas. Se busca grados de satisfacción de cada alternativa mediante la ecuación (33):

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{j=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}}} \quad (33)$$

Donde:

$Q_i \rightarrow$ Prioridad relativa.

$S_{+i} \rightarrow$ Peso normalizado positivo.

$S_{-i} \rightarrow$ Peso normalizado negativo.

6. Cálculo del rendimiento por niveles. Trata de comparar cualidades de cada una de las alternativas con el de buscar la más eficiente de forma porcentual mediante la ecuación (34):

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100 \quad (34)$$

Donde:

$U_i \rightarrow$ Rendimiento.

$Q_i \rightarrow$ Prioridad.

$Q_{max} \rightarrow$ Prioridad máxima.

7. Ranking. Donde el valor con un valor elevado ocupará la primera posición.

Coefficiente de SPEARMAN

Para este análisis se deberá agrupar los resultados obtenidos por medio de la decisión de métodos multicriterio analizados con anterioridad, de preferencia esta agrupación será en parejas, realizando combinaciones con el fin de que todos estos métodos lleguen a combinarse unos con otros. Esta relación se la obtiene mediante la ecuación (35):

$$R_S = 1 - \frac{6 \sum_y d^2}{n(n^2-1)} \quad (35)$$

Donde:

$R_S \rightarrow$ Coeficiente de correlacion de Spearman.

$\sum_y d^2 \rightarrow$ Suma diferencias entre factores X & Y elevadas al cuadrado.

$n \rightarrow$ Cantidad de variables.

Luego de definir el proceso de cada método de selección múltiple, se ha definido seis pasos a seguir para el desarrollo del proyecto de investigación.

1. Determinar el funcionamiento de una columna estructural.
2. Determinar las características que posee el hormigón aplicado en columnas estructurales en el ámbito de la construcción.
3. Determinación de la geometría y precio de una columna de hormigón.
4. Determinar los criterios de selección de materiales mediante índices de rendimiento.

5. Selección de materiales mediante el software CES Edupack Granta Design.

6. Propuesta de vivienda de una planta.

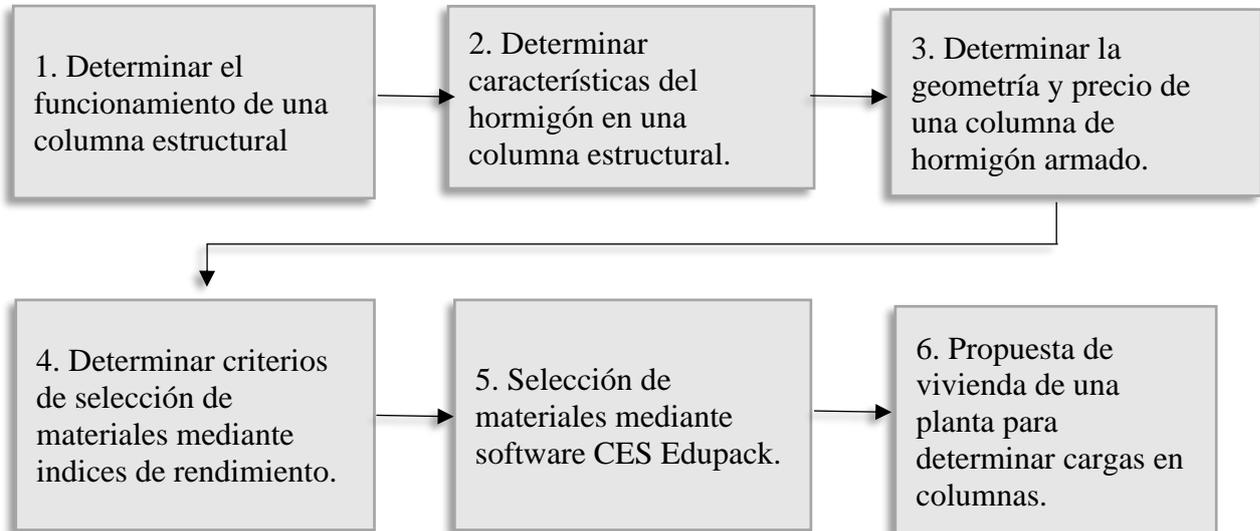


Figura 32. Secuencia metodológica.

Propuesta de vivienda de una planta

Previo al desarrollo de la simulación de elementos finitos, se plantea una propuesta de vivienda para su aplicación y comparación, esto para poder comparar los materiales base y preponderante obtenido mediante el análisis de métodos multicriterio, se analizará la columna más crítica que sufra de mayores cargas y esfuerzos para poder compararlos y validarlos. La propuesta de vivienda se muestra en la figura 33 y en la figura 34 se muestra la distribución de las columnas.

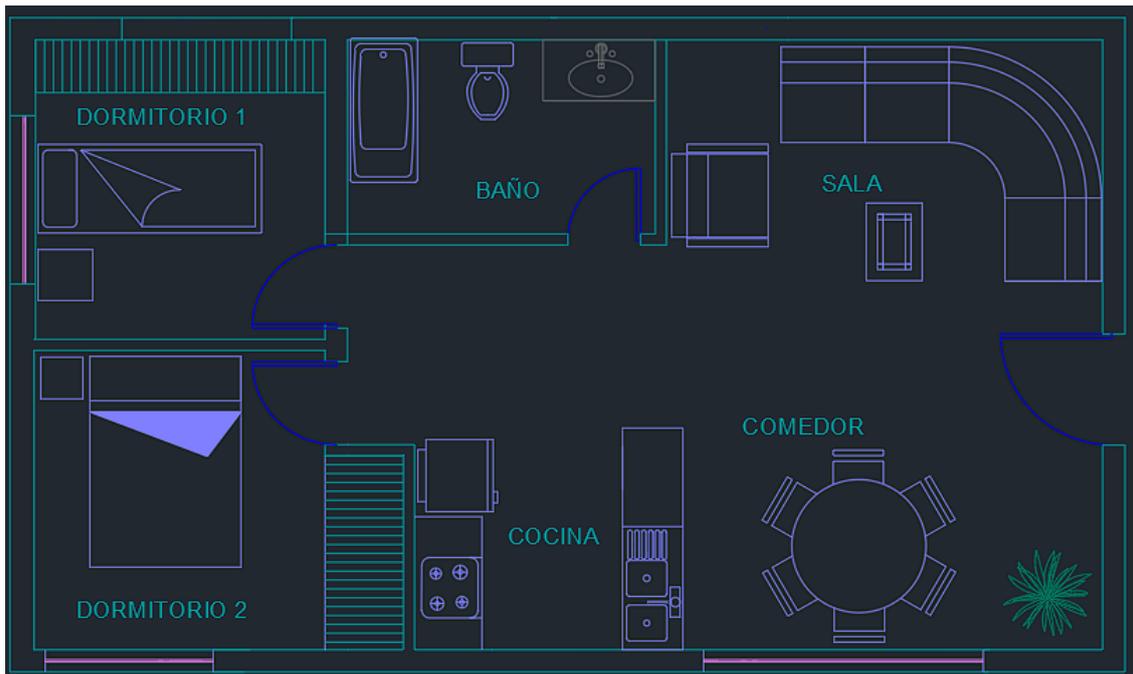


Figura 33. Distribución de la vivienda de una sola planta

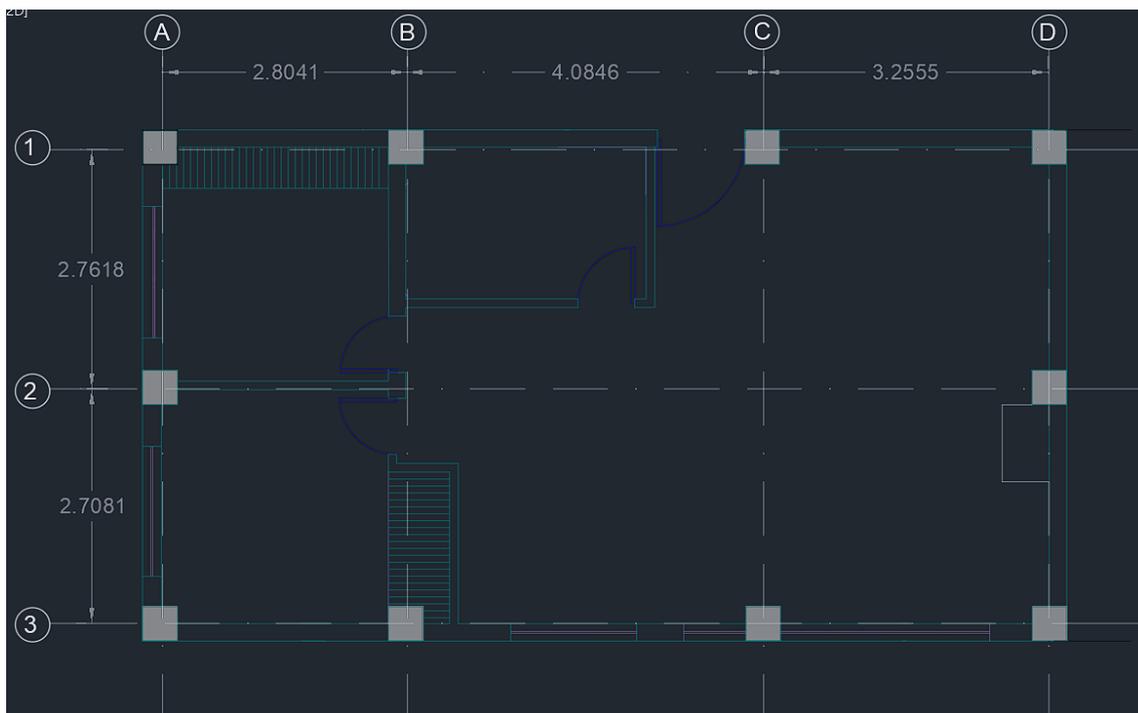


Figura 34. Distribución de columnas de la vivienda

Desarrollo de la Simulación

Los pasos a seguir para el desarrollo de la simulación son:

1. Determinar mediante la norma NEC-SE-CG: Cargas (no sísmicas), los parámetros de cargas muertas y vivas.
2. Determinar zonas y curvas de peligro sísmico acorde el sitio o región de aplicación de la estructura, determinar el factor de zona (Z) como se muestra en la figura 35. Estos valores serán obtenidos de la norma NEC-SE-DS: Peligro sísmico.
3. Determinar configuraciones estructurales y pórticos resistentes a momento mediante la normativa NEC-SE-VIVIENDA.
4. Insertar parámetros y geometrías de la estructura de la vivienda propuesta en el software Cype CAD, para poder determinar cargas críticas en cada una de las columnas con el fin de determinar la columna con más riesgos de fallo.
5. Simulación de esfuerzo-deformación mediante Inventor para poder realizar una comparativa de materiales.
6. Indices métodos optimizar

Determinación de cargas muertas y vivas

Para determinar las cargas muertas de la estructura, se basa en la norma NEC-SE-CG: Cargas (no sísmicas), se toma a consideración que la estructura acorde con la propuesta de vivienda es de una sola planta, la carga muerta a soportar por medio de las columnas es únicamente del peso propio de la cubierta. Este valor se lo encuentra en el apartado 4. Apéndice: valores de cargas muertas y vivas sección 4.1 Carga muerta: pesos de los materiales (tabla 18). En la tabla 5 se muestran los valores de los pesos para el material de uso frecuente en la construcción, en este caso será hormigón.

Tabla 5. Carga muerta: peso de los materiales

Material	Peso unitario KN/m^3
B. Piedras artificiales	
Adobe	16.0
Amianto – cemento	20.0
Baldosa cerámica	18.0
Baldosa de gres	19.0
Hormigón simple	22.0
Hormigón armado	24.0

Fuente: (NEC-SE-CG-Cargas sísmicas)

Se tomará el valor del hormigón armado donde su peso unitario en KN/m^3 es igual a 24.0. Para determinar la carga viva se debe determinar la ocupación y uso de la estructura, al ser una vivienda de una planta se tomará a consideración únicamente la carga de la cubierta de la vivienda, acorde con la normativa en el apartado 4.2 Carga viva: sobrecargas mínimas, sección 4.2.1 Sobrecargas mínimas uniforme distribuidas y concentradas (tabla 9). La tabla 6 se muestran los valores de cargas (uniforme y/o concentrada) de acuerdo con la ocupación y usos.

Tabla 6. Valores de cargas (uniformes y/o concentradas) acorde con la ocupación o uso

Ocupación o uso	Carga uniforme (KN/m^2)	Carga concentrada (KN)
Cubiertas		
Cubiertas planas, inclinadas y curvas	0.70	-
Cubierta destinada para áreas de paseo		-
Cubierta destinada jardinería o áreas de reunión	3.00	-
Cubiertas destinadas para propósitos especiales	4.80	-

Fuente: (NEC-SE-CG-Cargas sísmicas)

Se tomará en cuenta la ocupación o uso de cubiertas, cubiertas planas, inclinadas y curvas con un valor uniforme de $0.70 \text{ KN}/\text{m}^2$.

Determinación de zonas y curvas de peligro sísmico

Para determinar la zona y curva de peligro sísmico acorde con la normativa NEC-SE-DS: Peligro sísmico, se debe definir la región en donde estará ubicada la vivienda que determinará el factor de zona Z , para este caso estará ubicada en la región Oriente, provincia de Sucumbíos, cantón Shushufindi. En el apartado 3. Peligro sísmico del Ecuador y efectos sísmicos locales, sección 3.1. zonas sísmicas y curvas de peligro sísmico, subsección 3.1.1. zonificación sísmica y factor de zona Z . de acuerdo con el mapa mostrado anteriormente en la figura 39, muestra las zonas sísmicas del Ecuador para el propósito de diseño. En la tabla 7, muestra los valores del factor Z en función de la zona sísmica adoptada, este valor (Z) será de 0.15 con la caracterización de peligro sísmico intermedia.

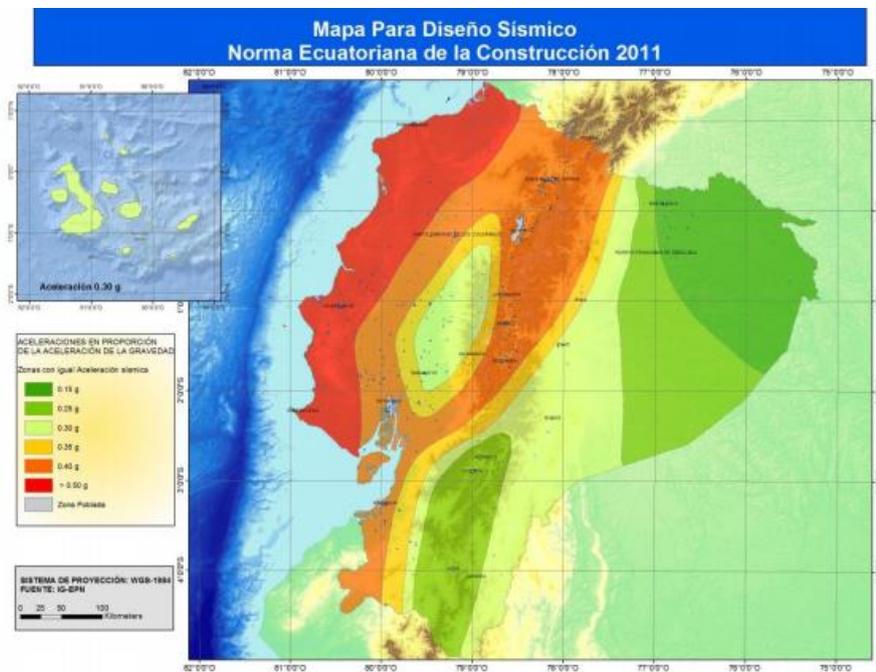


Figura 35. Ecuador, zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor de factor Z .
Fuente: (NEC-15, NEC-SE-DS. 2014)

Según la Normativa Ecuatoriana de construcción NEC (NEC-15, NEC-SE-DS. 2014), “El mapa de zonificación sísmica, el diseño proviene del resultado del estudio de

peligro sísmico para un 10% de excedencia en 50 años, incluye una saturación a 0.50 g de valores de aceleración en roca en el litoral ecuatoriano caracterizado por zona VI.”

(2015, p.27)

En la siguiente tabla se cataloga el valor Z y caracterización del peligro sísmico; todo el Ecuador está catalogado como zona de alta sísmica, con excepción de:

- Nororiente que presenta una amenaza sísmica intermedia.
- Litoral, zona sísmica de muy alto riesgo sísmico.

Tabla 7. Valores de factor Z en funcione de la zona sísmica adoptada.

Zona sísmica	I	II	III	IV	V	VI
Valor Z	0.15	0.25	0.30	0.35	0.40	>0.50
Caracterización del peligro sísmico	Intermedia	Alta	Alta	Alta	Alta	Muy alta

Fuente: (NEC-15, NEC-SE-DS. 2014)

En la subsección 3.1.2 curva de peligro sísmico, de acuerdo con lo estipulado en la sección 4.3.2, es necesario definir un factor de importancia sísmica con el fin de verificar un nivel de desempeño para el diseño de estructuras acorde con la ocupación que se le vaya a dar. En la tabla 8 muestra el tipo de usos para las edificaciones. (MIDUBI, 2015)

Tabla 8. Tipo de uso, destino e importancia de la estructura

Categoría	Tipo de uso, destino/importancia	Coefficiente I
Edificaciones especiales	Hospitales, clínicas, centros de salud o de emergencia sanitaria. Instalaciones militares, de policía, bomberos, defensa civil, etc.	1.5
Estructuras de ocupación especial	Museos, iglesias, escuelas y centros de educación o deportivos que albergan más de trescientas, cinco mil personas, edificio público	1.3
Otras estructuras	Todas las estructuras de edificación y otras que no clasifican dentro de las demás categorías	1.0

Fuente: (NEC-SE-DS-Peligro sísmico)

La vivienda propuesta en la presente investigación entra en la categoría de otras estructuras, que como lo estipula, son otras estructuras que se clasifican dentro de los otros tipos de usos, destinos o importancia donde el coeficiente de importancia I será 1.0. Para poder definir niveles de aceleración sísmica, la norma proporciona diferentes graficas de peligro probabilístico de peligro sísmico para cada capital por provincia, donde la capital de Sucumbíos es nueva Loja donde se encontraría la vivienda propuesta, en la figura 36 relaciona el valor de aceleración sísmica en el terreno (PGA) con un nivel de excedencia anual probabilística. (MIDUBI, 2015)

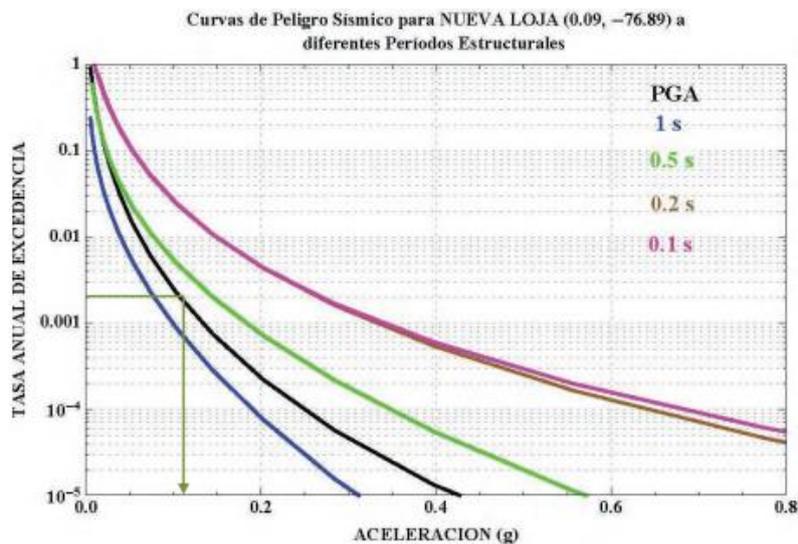


Figura 36. Curvas de peligro sísmico, Nueva Loja

Fuente: (NEC-SE-DS-Peligro sísmico, parte 1)

Determinación de configuraciones estructurales y pórticos resistentes a momento

En el apartado 5. Pórticos resistentes a momento, sección 5.2. Pórticos de hormigón armado con secciones de dimensión menor a la especificada en la NEC-SE-HM, detalla que la construcción de viviendas con un sistema estructural limita a la construcción de viviendas a 2 pisos en terreno plano sin la posibilidad a una ampliación

en cuanto a la elevación de la estructura, se tomara en cuenta los valores en columnas para el diseño como se muestra en la tabla 9. (NEC SE Vivienda, 2015)

Tabla 9. Requisitos mínimos en función del número de pisos de la vivienda.

Número de pisos vivienda	Elemento	Luz máxima (m)	Total de entrepiso máxima (m)	Base x Altura (cm x cm)
1	Columna	4.0	2.50	20 x 20
	Viga			15 x 20

Fuente: (NEC-SE-Vivienda, parte 2)

Se toma los valores de números de pisos de la vivienda, que será de un piso en columnas de luz Máxima de 4 metros con un total de entrepiso máximo de 2.50 metros con dimensiones de la columna de 20x20 centímetros, en las columnas de la vivienda propuesta se toma dimensiones de columnas de 20x25 cm, esto con el fin de poder predecir el área de menor inercia para poder ver la dirección de pandeo.

Simulación en software Cype CAD

La tabla 10 muestra las características de la simulación obtenidos mediante la normativa ecuatoriana de la construcción en el software CYPE Cad.

Tabla 10. Características de la simulación

Cargas muertas	Peso unitario (KN/m³)
Material (Hormigón armado)	24.0
Cargas vivas (ocupación o uso)	Carga uniforme (KN/m ³)
Cubiertas planas, inclinadas y curvas	0.70
Determinación de zona de peligro sísmico	Factor Z
Sucumbíos, cantón Shushufindi	0.15
Factor de importancia sísmica	Coeficiente I
Otras estructuras	1.0
Geometría de columna	Base x altura (cm x cm)
1 piso luz de 4 metros	20 x 25

Resistencia del hormigón	(Kg/cm ²)
Hormigón	210.0

Una vez definido las características se procede a introducirlos en el software CYPE Cad, con el fin de poder determinar las diferentes cargas presentes en cada una de las columnas que conforma la vivienda, tomando a consideración tanto cargas por acciones sísmicas, cargas muertas y vivas como se muestra en la figura 37. El software tomara en cuenta el peso propio de la estructura, carga muerta definida anteriormente de 24.0 KN/m^3 y carga viva de 0.70 KN/m^2 .

The screenshot shows the 'NEC-SE-DS 2014' configuration window. Key settings include:

- Norma:** NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN (Peligro sísmico. Diseño sísmo resistente).
- Acción sísmica:** Checked for both X and Y directions.
- Método de análisis:** Dinámico (modal espectral).
- Definición del espectro:** Según norma.
- Parámetros de cálculo:** Fracción de sobrecarga de uso: 0.00; Factor multiplicador del espectro: 1.00.
- Sistema estructural:** Coeficiente de reducción (X, Y): 3.00; Coeficiente de regularidad en planta/elevación: 0.90; Geometría en altura: Regular.
- Caracterización del emplazamiento:** Zona sísmica: I; Región sísmica: Oriente.
- Tipo de suelo:** C (Perfiles de suelos muy densos o roca blanda).
- Importancia de la obra:** Otras estructuras.
- Número de modos de vibración:** Según norma.

Figura 37. Factores sísmicos acorde a la norma NEC-SE-DS 2015

La ventaja al trabajar con este software es que tiene incorporada las normas de construcción de cada país, facilitando el proceso de cálculo y diseño; cómo se puede observar, se toma a consideración para el cálculo acciones sísmicas según X e Y realizando un método de análisis dinámico, definiendo un espectro sísmico acorde la

normativa NEC-SE-DS, la estimulación del periodo fundamental se refiere a lo planteado en la figura 36. Dentro de la caracterización del emplazamiento se escoge la zona donde estará ubicada la vivienda para obtener factores de acción sísmica Z . Se define la importancia de la obra definida anteriormente en la tabla 8 otras estructuras; dentro de, sistema estructura, se define la regularidad en planta.

Luego de esto se define los parámetros generales para las columnas de hormigón armado como muestra la figura 38, se trabaja con el hormigón de resistencia de 210 Kg/cm^2 , utilizando un acero de grado 60.

Figura 38. Datos generales para columnas de hormigón armado

Para poder realizar el análisis, se insertaron vigas o cadenas para que el programa pueda calcular todas las cargas presentes en cada columna sin dar errores; se introdujeron de igual manera vigas de hormigón armado bajo los mismos criterios mostrados en la figura 38.

En la figura 39 se puede observar la estructura con las diferentes geometrías de cada elemento; las letras C representan a cada columna y entre paréntesis la geometría de la columna de 20x25, las vigas son representadas como V101 de 15x20, esta geometría es insertada de manera automática por el programa trabajando con la geometría mínima de vigas acorde con la normativa.

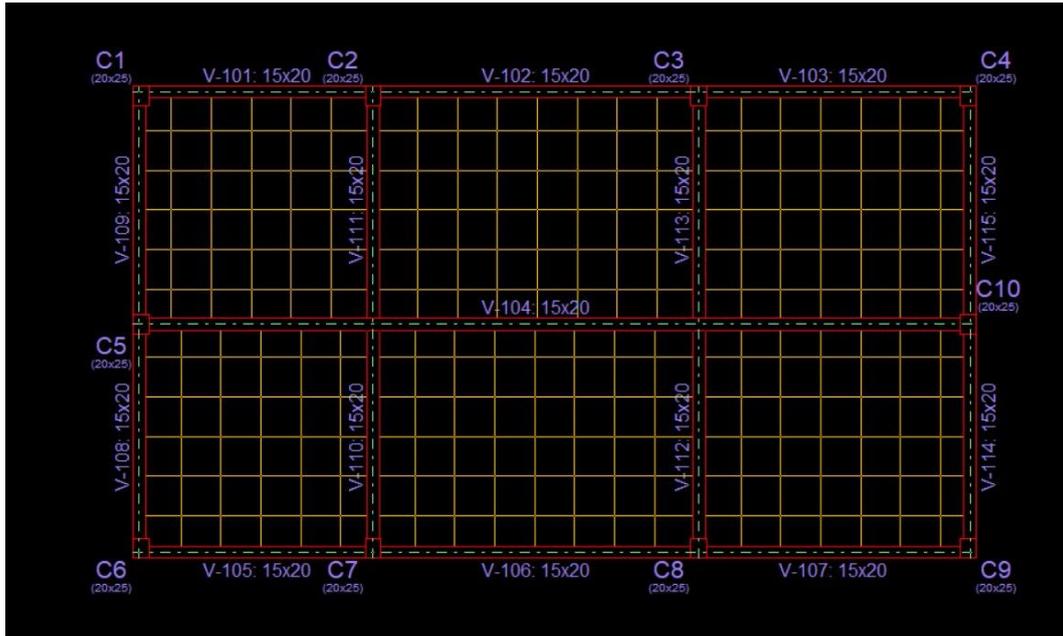


Figura 39. Representación de losa de la vivienda

Una vez insertado todos los parámetros, se procede a la ejecución del cálculo teniendo los distintos resultados de cargas, momentos y cortantes en cada eje. La figura 40, muestra que las columnas esquineras C1, C4, C6 y C9, van a tener valores de cargas y esfuerzos iguales, al igual que las columnas C5 y C10 que son las columnas intermedias y las columnas C2, C3, C7 y C8 son las columnas centrales que tendrán de igual manera los mismos valores.

		C1, C4, C6 y C9	C5 y C10	C2, C3, C7 y C8
	planta baja	 L:4Ø14+Y2Ø12 T:1eØ10	 L:4Ø16+Y2Ø16 T:1eØ10	 L:4Ø16+Y2Ø12 T:1eØ10
	Cimentación	 L:4Ø14+Y2Ø12 T:1eØ10	 L:4Ø16+Y2Ø16 T:1eØ10	 L:4Ø16+Y2Ø12 T:1eØ10

Figura 40. Conjunto de columnas de igual carga y esfuerzos

La figura 41, muestra los valores obtenidos de momentos en X e Y, carga axial y cortantes respectivamente de la columna 1-A (figura 34) donde los valores obtenidos van a ser los mismos para las columnas C1, C4, C6 y C9, donde su carga axial es igual a 0.38 toneladas, momento máximo y mínimo en X es de 0.06 y -0.04 toneladas respectivamente, los momentos máximos y mínimos en Y son de -0.11 y 0.07 toneladas. Los esfuerzos cortantes en X e Y son de -0.03 y -0.06 toneladas respectivamente.

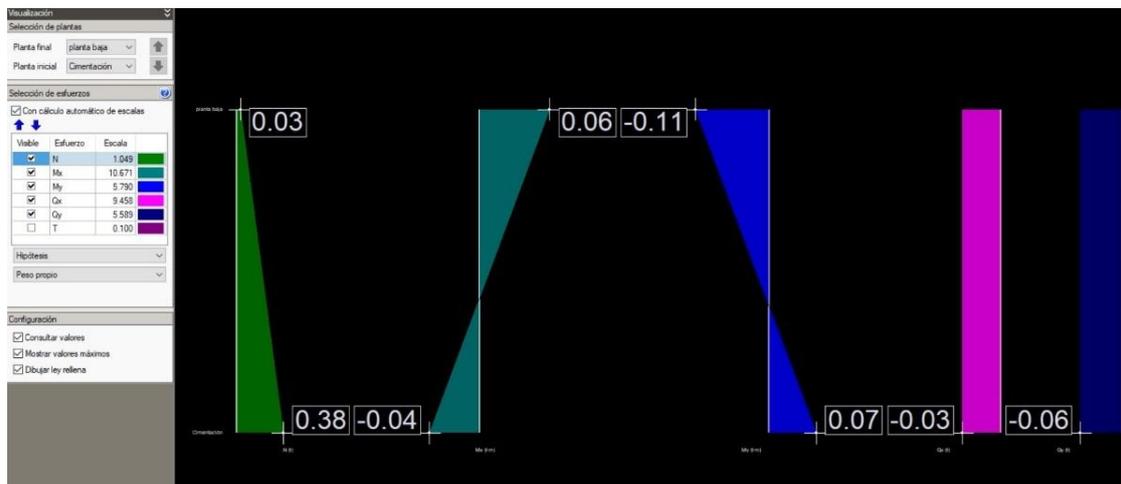


Figura 41. Esfuerzos presentes en columna 1-A

La figura 42 muestra los valores obtenidos de la columna 2-A (figura 34) serán valores igual para las columnas C5 y C10, donde su carga axial es de 3.40 toneladas, momento máximo y mínimo en X es de 0.30 y -0.20 toneladas, momento máximo y mínimo en Y es igual a 0 y los esfuerzos cortantes en X e Y son de -0.18 y 0 toneladas.

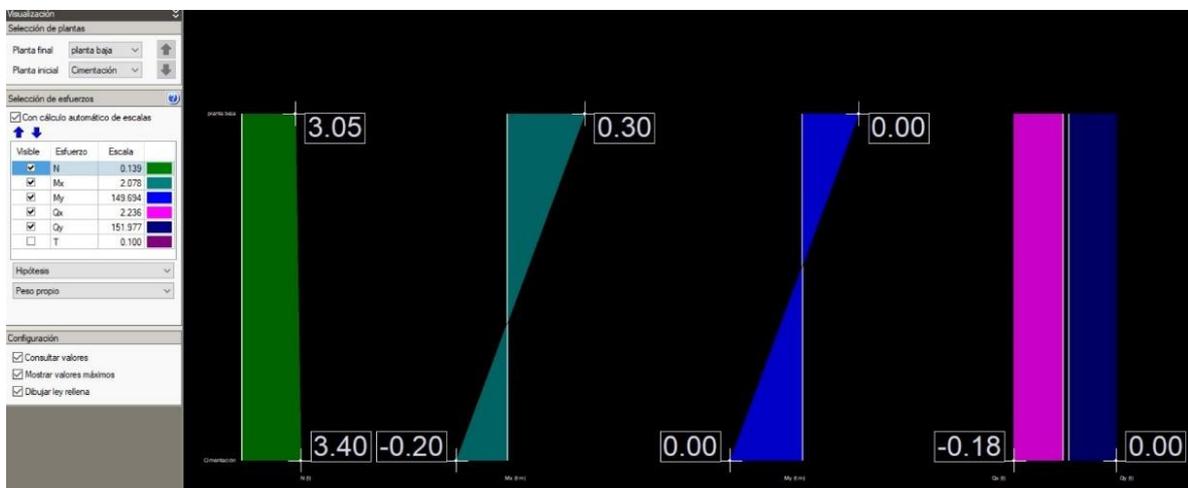


Figura 42. Esfuerzos presentes en columna 2-A

La figura 43, muestra valores obtenidos de la columna 1-B (figura 34) donde sus valores serán los mismos para las columnas C2, C3, C7 y C8, donde su carga axial es de 4.15 toneladas, momento máximo y mínimo en X es de 0.05 y -0.04 toneladas, momento máximo y mínimo en Y es igual a -0.54 y 0.35, los esfuerzos cortantes en X e Y son de -0.03 y -0.32 toneladas.

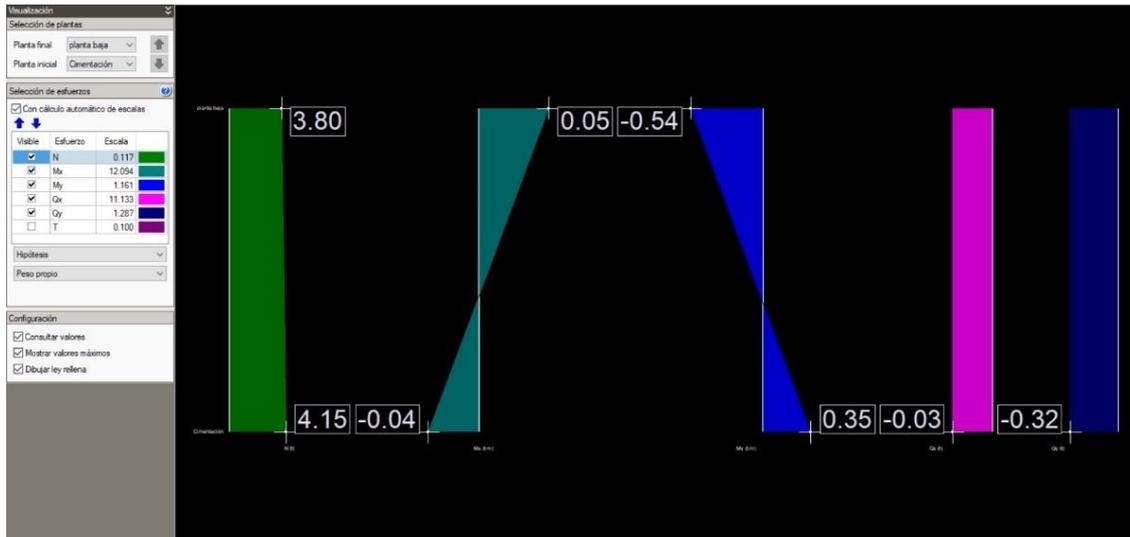


Figura 43. Esfuerzos presentes en columna 1-B

Con la obtención de estos resultados se puede determinar que las columnas con mayor carga axial son las columnas centrales de la vivienda, esto se debe a que tienen un área colaborante mayor a las demás; estas columnas serán las más propensas al fallo por lo que se tomara estos valores como críticos para la posterior simulación en Inventor Nastran, para poder comparar mediante el criterio de esfuerzo-deformación el material base de hormigón con el material preponderante obtenido a través de los métodos multicriterio, Bambú.

Modelado CAD

El primer paso para realizar el proceso de simulación es definir la geometría de cada elemento, anteriormente se definió que la geometría de la columna será de 20x25 cm con una longitud de 3 metros como muestra la figura 44.

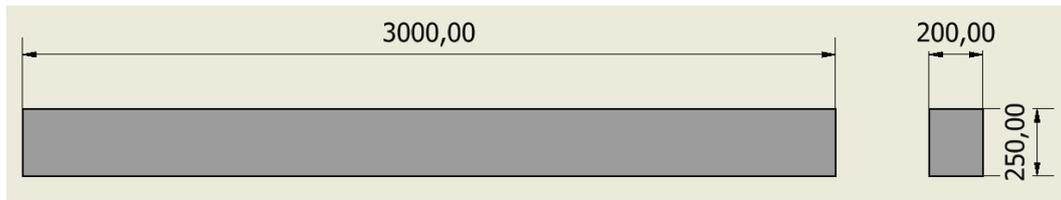


Figura 44. Plano de columna de hormigón

Para poder determinar la geometría del bambú se determina una lista de bambúes más comúnmente utilizados en la construcción como muestra la tabla 11.

Tabla 11. Géneros y características de bambúes.

Genero	Altura (m)	Diámetro (cm)	Origen
Bambusa	6 a 30	3 a 18	China, India y Taiwán
Chusquea	4 a 6	2 a 4	Chile y Argentina
Dendrocalamus	20 a 35	20 a 30	India, Birmania y Lanka
Gigantochla	10 a 16	8 a 15	Malasia, Indonesia y Filipinas
Guadua	10 a 30	5 a 15	Ecuador, México, Colombia, Bolivia y Panamá
Phyllostachys	5 a 22	2 a 17	China y Japón

Fuente: (García, 2015)

Se escogerá el diámetro mayor de la caña guadua que se encuentra en Ecuador siendo este de 15 cm de diámetro, para el diámetro interior que vendría a ser el espesor, la norma NEC-SE-GUADUA: Estructuras de guadua, nos dice que “Se debe tomar mediciones en cada sección transversa del culmo, y medir, además, el espesor en los mismos sitios en que se midió el diámetro. El espesor real corresponde al promedio de ocho mediciones” (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2016). Debido a que no se puede tomar medidas de una caña física, se considera el diámetro mayor de 15 cm y lo dividimos para 8 supuestas mediciones realizadas dando como resultado de 1.875 cm como espesor y 3 metros de longitud. Debido a que el bambu no es un elemento circular totalmente hueco, en su interior tiene denominados diafragmas en forma de campana, estos elementos no seran tomados a consideracion por la falta de referencias en cuanto a su geometria como muestra la figura 45.

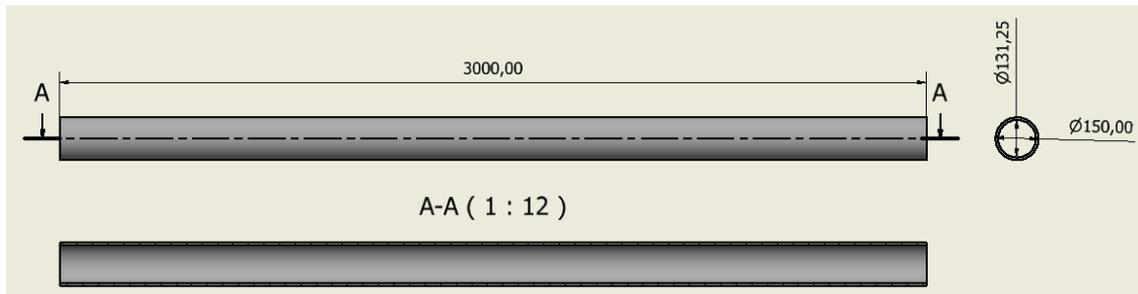


Figura 45. Geometría de Bambú

Simulación de esfuerzos-deformación en Inventor

Una vez realizado el modelado CAD-3D de cada uno de los elementos, para realizar la simulación de una columna, es necesario tener instalado el software Inventor, el cual ofrece una amplia variedad de tipos de estudios y materiales en su análisis, de igual manera, ofrece herramientas de análisis de elementos finitos donde su simulación cubre múltiples tipos de análisis más amplios. La tabla 12 muestra las características físicas y mecánicas del bambú, con el fin de poder añadir un nuevo material a la biblioteca de inventor; estos valores son obtenidos a través del software CES Edupack.

La tabla 12, 13 y 14 muestra un resumen de las características del mallado utilizado, configuración de la convergencia y las propiedades físicas y mecánicas (obtenidas de CES Edupack Tabla 4) de cada material utilizados en simulación de software INVENTOR. De igual manera se detalla más adelante el procedimiento explicativo de la obtención de los diferentes datos mostrados en las tablas mencionadas.

Tabla 12. Características del mallado

Configuración de malla	
Características	Valor
Tamaño medio del elemento	0.0010
Tamaño mínimo del elemento	0.020
Factor de modificación	1.50
Angulo máximo de giro	30.0°

Tabla 13. Configuración de la convergencia

Configuración de convergencia	
Características	Valor
Numero de refinados h	10
Criterios de parada (%)	1.00
Umbral de refinado h (de 0 a 1)	0.750
Selección de geometría	Toda la geometría

Tabla 14. Características mecánicas del bambú y hormigón

Variables		Materiales	
Propiedades	Características	Bambú	Hormigón
Físicas	Densidad Kg/m^3	700	$2,4e^3$
Mecánicas	Módulo de Young (Gpa)	17,5	20
	Resistencia a la tracción (Mpa)	239,5	1,2
	Resistencia a la compresión (Mpa)	80	30
	Coefficiente de poisson	0,46	0,3
	Límite de fluencia (Mpa)	40	1,2
	Módulo cortante (Gpa)	1,08	17,4

Es necesario definir el material de cada elemento estructural, en este caso será de hormigón aplicado a una columna rectangular y bambú aplicado a una columna circular hueca por el tipo de geometría que posee el bambú. Los datos que se requieren para la simulación son detallados en la figura 46 que serán aplicados al estudio, el hormigón

como material base actual y el bambú como material preponderante obtenido a través del análisis MCDM.

Editor de materiales: Hormigón	Editor de materiales: BAMÚ
Información	Información
Nombre: Hormigón	Nombre: caña guadua
Descripción: Hormigón por defecto F'c=3...	Descripción: Activo estructural genérico.
Palabras clave: estructural,hormigón,CC:ACI 318	Palabras clave: estructural,genérico
Tipo: Hormigón	Tipo: Genérico
Subclase: Estándar	Subclase:
Origen: Autodesk	Origen: Autodesk
URL de origen:	URL de origen:
Térmico básico	Térmico básico
Conductividad térmica: 1,600E+00 Con (m · k)	Conductividad térmica: 1,000E-02 Con (m · k)
Calor específico: 0,800 J/ (G · ° C)	Calor específico: 0,100 J/ (G · ° C)
Coeficiente de dilatación térmica: 10,000 µm/(m·°C)	Coeficiente de dilatación térmica: 0,100 µm/(m·°C)
Mecánico	Mecánico
Comportamiento: Isótropo	Comportamiento: Isótropo
Módulo de Young: 23,246 GPa	Módulo de Young: 19,900 GPa
Coeficiente de Poisson: 0,17	Coeficiente de Poisson: 0,46
Módulo cortante: 9963,999 MPa	Módulo cortante: 1360,000 MPa
Densidad: 2,407 g/cm³	Densidad: 0,797 g/cm³
Hormigón	Resistencia
Compresión de hormigón: 24,129 MPa	Límite de elasticidad: 39,950 MPa
Modificación de esfuerzo cortante: 1,00	Resistencia máxima a tracción: 239,500 MPa
<input type="checkbox"/> Ligero	
Límite de elasticidad: 1,201 MPa	
Resistencia máxima a tracción: 1,300 MPa	

Figura 46. Parámetros de edición de materiales

Una vez aplicado y definido el material, en la pestaña entornos ejecutamos un nuevo análisis de tensión donde se puede detallar parámetros de investigación, rango de trabajo y niveles de precisión como se muestra en la figura 47; definimos las idealizaciones, se toma en cuenta que es un elemento sólido y de material de hormigón.

Crear nuevo estudio

Nombre:

Objetivo del diseño:

Tipo de estudio

Análisis estático

Detectar y eliminar modos de cuerpo rígido

Separar tensiones en superficies de contacto

Análisis de cargas de movimiento

Pieza

Paso de tiempo

Análisis modal

Número de modos

Rango de frecuencia -

Calcular modos precargados

Precisión mejorada

Generador de forma

Contactos

Tolerancia	Tipo
<input type="text" value="0,100 mm"/>	<input type="text" value="Bloqueado"/>
Rigidez normal	Rigidez tangencial
<input type="text" value="0,000 N/mm"/>	<input type="text" value="0,000 N/mm"/>

Tolerancia de conector de vaciado
(como un múltiplo de espesor de vaciado)

Figura 47. Idealizaciones del elemento

Luego se procede a definir las restricciones del elemento, la restricción se la localiza en la base de la columna, restricción fija como se muestra en la figura 48.



Figura 48. Aplicación de restricciones a columna de concreto

La figura 49, muestra la aplicación de cargas, en este caso se aplicará una fuerza de compresión definida anteriormente de 4.15 toneladas (40697.6 Newtons) por ser la

carga más crítica aplicada a las columnas C2, C3, C7 y C8. La carga es aplicada a la cara opuesta a la restricción, esto dependerá de los planos de dibujo en los que se dibujó el elemento anteriormente, de igual manera se toma en consideración para el cálculo a la gravedad de 9810 mm/s^2 .



Figura 49. Aplicación de cargas a columna de hormigón

Ahora el mallado que se define será de tipo tetraédrico de orden de elementos de 0.010 mm. Factor de modificación de 1.5 y ángulo máximo de giro de 30° , con esta configuración de mallado se obtiene un total de 55937 nodos y 36792 elementos, estos valores irán cambiando acorde la refinación de malla para llegar a la convergencia donde se obtendrán valores más precisos llegando hasta un total de 84879 nodos y 57363 elementos, a mayor número de nodos y elementos mejor será el resultado. La configuración de la convergencia se determina realizar un máximo de 10 iteraciones y 1% de falla para detener la simulación como se muestra en la figura 50.

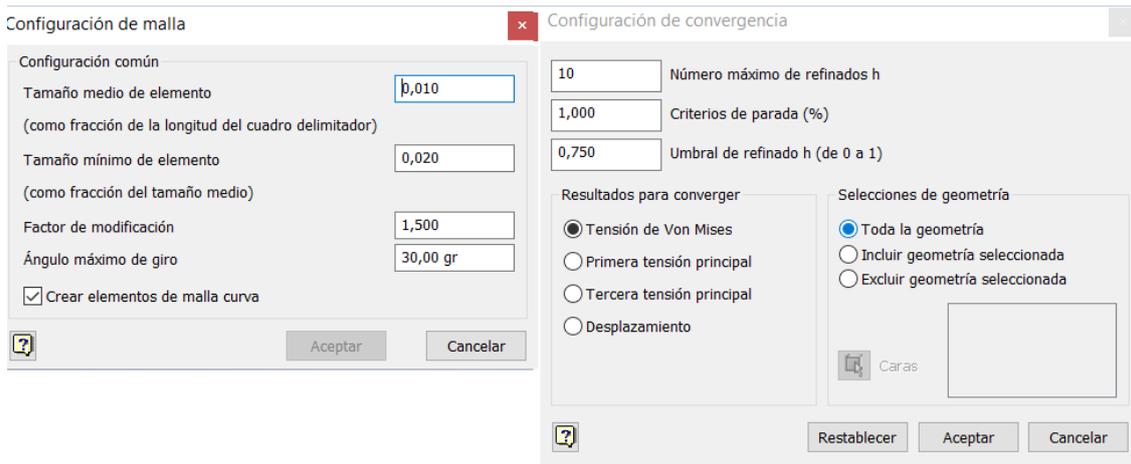


Figura 50. Configuración y convergencia de mallado en conjunto

El valor de carga se definirá en los resultados, obtenido diferentes resultados al aplicar cargas ascendentes para poder apreciar un factor de seguridad mayor a 1, de lo contrario el material o elemento tenderá a fallar.

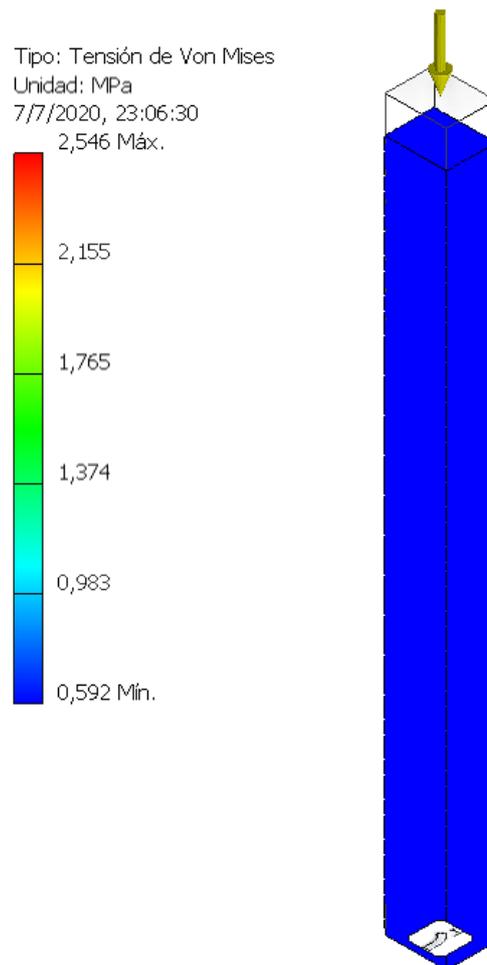


Figura 51. Resultado de simulación

En la tabla 15 se muestra las condiciones de cargas para el análisis de cada elemento de distinto material y geometría.

Tabla 15. Condiciones de carga para cada elemento estructural

Carga	Hormigón y Bambú	Hormigón y Bambú	Hormigón y Bambú
Fuerza 1	0.38 Ton. -3726.53 N	3.40 Ton. -33342.61 N	4.15 Ton. -40697.6 N
Fuerza 2 (gravedad)	9810 mm/s ²	9810 mm/s ²	9810 mm/s ²

Para la simulación de una columna de bambú, se realiza el mismo procedimiento que el de la columna de hormigón con la única variante que el material será de Bambú, este procedimiento se lo realizará varias veces con la aplicación de las cargas definidas en la tabla 15, confirmando la validación de simulación en software como muestra la figura 51.

Análisis y presentación de resultados

Luego de obtener una lista de posibles materiales candidatos para reemplazo del hormigón, se procede a realizar el análisis y selección mediante los métodos multicriterio escogidos. Debe estar enfocado a encontrar un método que se adhiera a las necesidades del estudio.

Para el desarrollo del análisis por medio de ponderación de pesos y métodos multicriterio MCDM se detalla la codificación de cada material de la tabla 16.

- M1. Tablero de fibra de madera extraduro, paralelo al tablero.
- M2. Tablero de fibra de madera extraduro, perpendicular al tablero.
- M3. Tablero de fibra de madera dura, paralelo al tablero.
- M4. Tablero de fibra de madera dura, perpendicular al tablero.
- M5. Tablero de cartulina prensada.
- M6. Tablero de papel a base de celulosa.
- M7. Bambú.
- M8. Panel de madera dura, paralelo al tablero.
- M9. Panel de madera dura, perpendicular al tablero.
- M10. Panel de madera Plywood.

Tabla 16. Propiedades de materiales candidatos al análisis de ponderación de pesos y MCDM.

VARIABLES		PROPIEDADES									
PROPIEDADES	CARACTERISTICAS	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
Costo	USD/Kg	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	1,1	1,67	0,28	0,28	0,58
Físicas	Densidad Kg/m^3	1000	1000	900	850	850	925	700	902,5	902,5	750
	Módulo de Young (Gpa)	8,65	5,4	6,05	3,8	3,8	3	17,5	2,95	0,75	9,95
	Resistencia a la tracción (Mpa)	45	37,5	36	30	30	24,5	239,5	18	0,8	19
Mecánicas	Resistencia a la compresión (Mpa)	45	30	39,7	26,5	26,5	48	80	37,5	30	30,5
	Coefficiente de poisson	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,45	0,46	0,3	0,3	0,3
	Límite de fluencia (Mpa)	27	34	21,6	26,5	26,5	24,5	40	15	0,7	15,5
	Módulo de cortante (Gpa)	0,2	1	0,2	1	1	1,5	1,08	0,5	1,15	2,04
Ecológicas	Reciclabilidad	No	No	No	No	Si	Si	Si	No	No	No
	Biodegradabilidad	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si	Si
	Huella de CO ₂ , producción primaria (Kg)	1.52	1.51	1.52	1.52	2.0	2.34	0.004	3.75	3.75	2.73

Resultados obtenidos de CES Edupack

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de índices de rendimiento acorde con la aplicación de las ecuaciones 1 y 2 en el nivel 3 Eco-design del software, en términos de diseño de rigidez limitada minimizando costos y el diseño de rigidez limitada minimizando el impacto ambiental respecto a la huella de CO₂ se obtuvo distintos grupos de materiales plásticos, compuestos, elastómeros y materiales naturales como muestra la figura 52. El esfuerzo limitado se refiere a esfuerzos de compresión debido al elemento que se trabajó en el estudio.

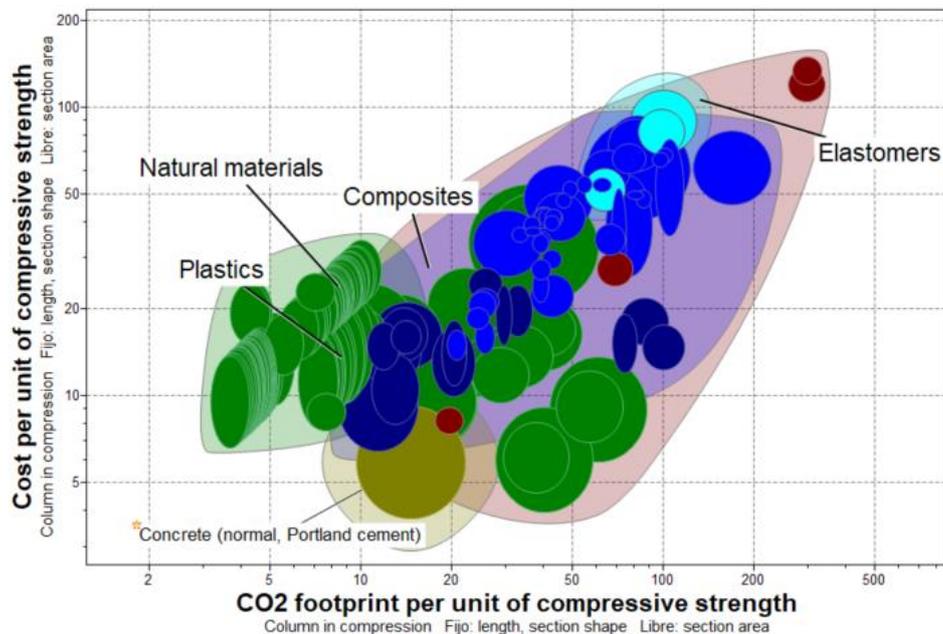


Figura 52. Resultado grafico de materiales nivel 3 de CES Edupack con la aplicación de índices de rendimiento.

Se puede determinar que los materiales con menor huella de CO₂ producida son los materiales naturales, en este grupo se encuentran principalmente las maderas, al ser materiales procedentes de la naturaleza, no requieren de un proceso previo en su elaboración o construcción de igual manera son materiales de menor costo. Seguido de los materiales compuestos y plásticos, se excluye los plásticos ya que son materiales que no son reciclables y/o biodegradables que no son acorde al diseño sostenible planteados en la investigación.

En un segundo análisis de selección dentro del software, se utilizó el nivel dos en la clasificación de superestructuras. Se realizó este segundo análisis ya que al ser la columna un elemento estructural, este nivel toma a consideración materiales para arquitectura en aplicación y construcción de edificaciones. Se aplicó los mismos criterios en cuanto a índices de rendimiento obteniendo grupo de materiales especialmente de maderas, madera plywood, glulam, bambú, paja y corcho principalmente estos elementos son tableros o paneles estructuras utilizados en la construcción excluyendo al bambú que es un elemento herbáceo hueco de geometría tubular. Los resultados se muestran en la figura 53.

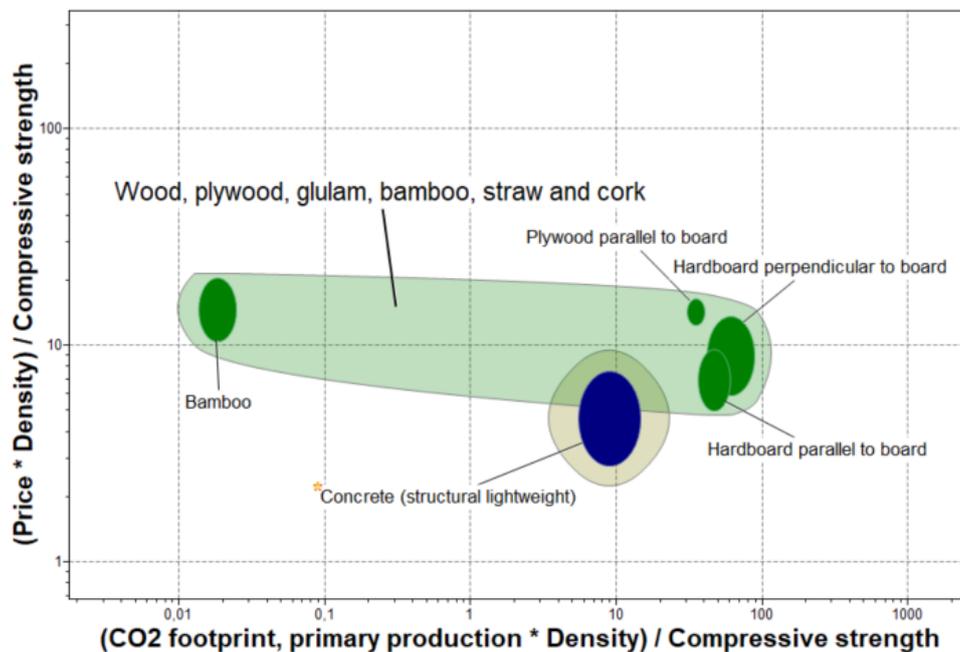


Figura 53. Resultado gráfico de materiales nivel 2 de CES Edupack con la aplicación de índices de rendimiento.

Cabe destacar en el estudio del nivel dos del software CES Edupack tomando a consideración únicamente materiales en criterios de arquitectura y superestructuras, se obtuvo el material óptimo al reemplazo de hormigón, como mostro el análisis realizado mediante métodos multicriterio.

Resultados por índices de rendimiento

Para obtener la solución por índices de rendimiento se aplica las ecuaciones 1 (FOM_1) y 2 (FOM_2) a cada uno de los materiales, donde el valor más bajo obtenido será el ganador en Ranking acorde al precio y huella de CO_2 agrupados en la tabla 17.

Tabla 17. Solución por índices de rendimiento

Material	FOM_1	Ranking	FOM_2	Ranking
M1	10	3	33.77	2
M2	15	8	50.33	6
M3	10.20	4	34.45	3
M4	14.43	6	48.75	5
M5	14.43	6	64.15	7
M6	21.19	9	45.09	4
M7	14.61	7	0.035	1
M8	6.73	1	90.25	9
M9	8.42	2	112.81	10
M10	14.26	5	67.13	8

Para poder realizar un análisis exhaustivo, se aplica un diagrama de Pareto valiéndose de su principio, la regla 80/20, para poder asignar un orden de prioridades para poder facilitar el estudio de materiales de bajo costo y huella de CO_2 mediante la aplicación de índices de rendimiento. De la gráfica 54 se puede deducir que el 80% de los materiales de menor costo son el M5, M10, M3, M1, M9 Y M8 destacando el ultimo por ser el de menor costo. De la gráfica 55 se puede deducir que el 80% de los materiales de baja huella de CO_2 son M2, M4, M6, M3, M1 y M7 destacando el ultimo por ser el material con menor huella de CO_2 en su producción primaria. Por lo tanto, se puede concluir que el 80% de los materiales en cuanto a costo y huella de CO_2 serán los adecuados para su aplicación en la construcción en comparación al 20% del resto.

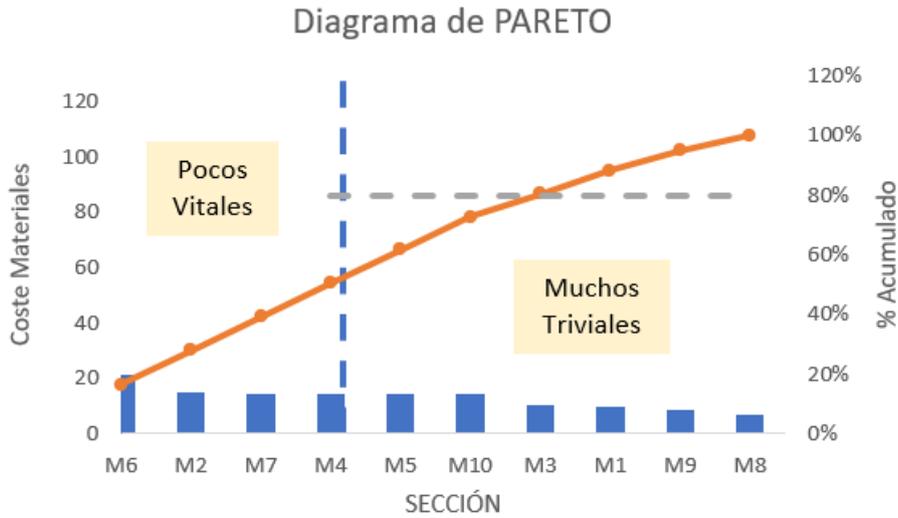


Figura 54. Diagrama de Pareto FOM1

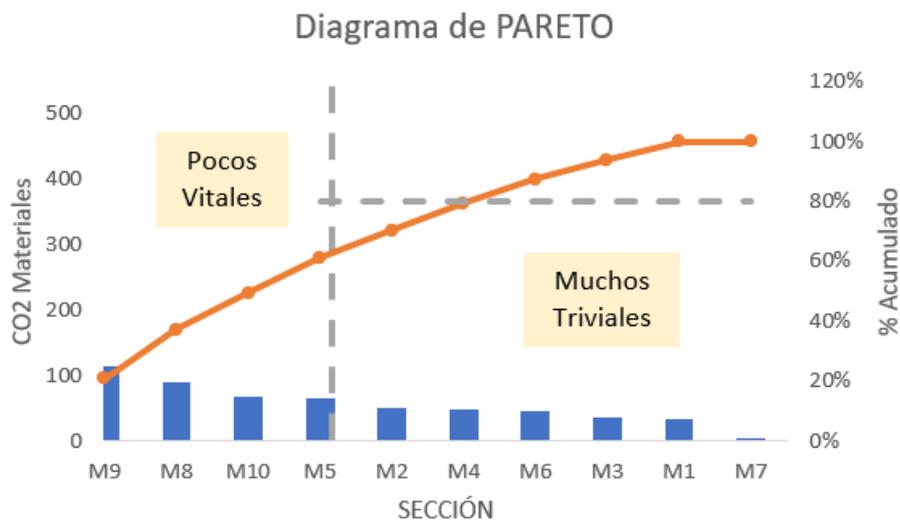


Figura 55. Diagrama de Pareto FOM2

Desarrollo de método de ponderación de pesos

Método de entropía

Para empezar con el análisis del método de entropía, se procede a agrupar los datos de los materiales y propiedades de la tabla 16 en una sola matriz:

Material	Módulo de Young (Gpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Límite de fluencia (Mpa)	Módulo de cortante (Gpa)	Densidad (Kg/m ³)	Precio (USD/Kg)	CO ₂
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)	C9
(M1)	8.65	45	45	0.3	27	0.2	1000	0.45	1.52
(M2)	5.4	37.5	30	0.3	34	1	1000	0.45	1.51

Continuación Matriz

Material	Módulo de Young (Gpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Límite de fluencia (Mpa)	Módulo de cortante (Gpa)	Densidad (Kg/m ³)	Precio (USD/Kg)	CO ₂
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)	C9
(M3)	6.05	36	39.7	0.3	21.6	0.2	900	0.45	1.52
(M4)	3.8	30	26.5	0.3	26.5	1	850	0.45	1.52
(M5)	3.8	30	26.5	0.3	26.5	1	850	0.45	2
(M6)	3	24.5	48	0.45	24.5	1.5	925	1.1	2.34
(M7)	17.5	239.5	80	0.46	40	1.08	700	1.67	0.004
(M8)	2.95	18	37.5	0.3	15	0.5	902.5	0.28	3.75
(M9)	0.75	0.8	30	0.3	0.7	1.15	902.5	0.28	3.75
(M10)	9.95	19	30.5	0.3	15.5	2.04	750	0.58	2.73

Esta tabla será utilizada para todos los métodos de ponderación de pesos y MCDM. Los materiales se han codificado con la letra M mencionados anteriormente. Los pesos obtenidos por cada uno de los métodos serán representados por la letra w y un número que indica el criterio al cual pertenece.

1. Matriz de decisión.

$$X = \begin{pmatrix} 8.65 & 45 & 45 & 0.3 & 27 & 0.2 & 1000 & 0.45 \\ 5.4 & 37.5 & 30 & 0.3 & 34 & 1 & 1000 & 0.45 \\ 6.05 & 36 & 39.7 & 0.3 & 21.6 & 0.2 & 900 & 0.45 \\ 3.8 & 30 & 26.5 & 0.3 & 26.5 & 1 & 850 & 0.45 \\ 3.8 & 30 & 26.5 & 0.3 & 26.5 & 1 & 850 & 0.45 \\ 3 & 24.5 & 48 & 0.45 & 24.5 & 1.5 & 925 & 1.1 \\ 17.5 & 239.5 & 80 & 0.46 & 40 & 1.08 & 700 & 1.67 \\ 2.95 & 18 & 37.5 & 0.3 & 15 & 0.5 & 902.5 & 0.28 \\ 0.75 & 0.8 & 30 & 0.3 & 0.7 & 1.15 & 902.5 & 0.28 \\ 9.95 & 19 & 30.5 & 0.3 & 15.5 & 2.04 & 750 & 0.58 \end{pmatrix}$$

2. Normalización de matriz de decisión.

Para poder normalizar la matriz de decisión, se utiliza la ecuación (3) con los valores de la matriz X donde se obtiene la matriz normalizada resultante Pij.

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 0.139 & 0.093 & 0.114 & 0.090 & 0.116 & 0.020 & 0.113 & 0.073 \\ 0.087 & 0.078 & 0.076 & 0.090 & 0.146 & 0.103 & 0.113 & 0.073 \\ 0.097 & 0.074 & 0.100 & 0.090 & 0.093 & 0.020 & 0.102 & 0.073 \\ 0.061 & 0.062 & 0.067 & 0.090 & 0.114 & 0.103 & 0.096 & 0.073 \\ 0.061 & 0.062 & 0.067 & 0.090 & 0.114 & 0.103 & 0.096 & 0.073 \\ 0.048 & 0.051 & 0.121 & 0.135 & 0.105 & 0.155 & 0.105 & 0.178 \\ 0.282 & 0.498 & 0.203 & 0.138 & 0.172 & 0.111 & 0.079 & 0.271 \\ 0.047 & 0.037 & 0.095 & 0.090 & 0.064 & 0.051 & 0.102 & 0.045 \\ 0.012 & 0.001 & 0.076 & 0.090 & 0.003 & 0.118 & 0.102 & 0.045 \\ 0.160 & 0.039 & 0.077 & 0.090 & 0.067 & 0.210 & 0.085 & 0.094 \end{pmatrix}$$

3. Cálculo del valor de la entropía.

Para poder calcular el valor de la entropía, se utiliza la ecuación (4) y (5), empleando la constante K.

4. Cálculo del grado de divergencia.

Aplicando la ecuación (6), se puede obtener el grado de divergencia; la tabla 18 denota los valores d (divergencia).

Tabla 18. Resultados de Cálculo de Entropía (e) y Grado de Divergencia (d)

Entropía (e)	Valor	Divergencia (d)	Valor
e1	0.892	d1	0.107
e2	0.747	d2	0.252
e3	0.971	d3	0.028
e4	0.992	d4	0.007
e5	0.941	d5	0.058
e6	0.926	d6	0.073
e7	0.997	d7	0.002
e8	0.921	d8	0.078

5. Obtención de pesos.

Para poder obtener el valor de los pesos de cada criterio, se aplica la ecuación (7), se obtiene dividiendo cada valor del grado de divergencia para la sumatoria de los valores de divergencia. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 19.

Tabla 19. Resultado de pesos obtenidos del método de entropía.

w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8
0.176	0.414	0.046	0.011	0.096	0.121	0.003	0.129

Método de desviación estándar

1. Matriz de decisión.

Se utiliza la misma matriz utilizada en el método de entropía.

2. Cálculo de la desviación estándar.

Para evaluar los valores de la desviación estándar se utiliza la ecuación (8), se obtiene valores σ_j , estos valores corresponden a los valores de la desviación estándar.

La tabla 20 muestra los valores resultados obtenidos.

Tabla 20. Resultados obtenidos de la Desviación Estándar.

Numeral de desviación	Valor
σ_1	4.587
σ_2	64.888
σ_3	15.317
σ_4	0.062
σ_5	10.354
σ_6	0.536
σ_7	91.267
σ_8	0.413

3. Obtención de pesos para cada criterio.

Mediante la aplicación de la ecuación (9), se obtiene el valor de los pesos de cada uno de los criterios w , agrupados en la tabla 21.

Tabla 21. Pesos obtenidos mediante el método de desviación estándar.

w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8
0.024	0.346	0.081	0.0003	0.055	0.002	0.486	0.002

Método de variación estadística

1. Matriz de decisión.

Se utiliza la misma matriz de decisión usada en el método de entropía.

2. Normalización de la matriz de decisión.

Para poder normalizar la matriz de decisión, se utiliza la ecuación (10), (12) y (12) respectivamente para poder encontrar los valores máximos y mínimos. En la tabla 22 se agrupan los valores obtenidos.

Tabla 22. Matriz de decisión normalizada del método de Variación Estadística. `

P11	0.022	P12	0.011	P13	0.025	P14	0.004	P15	0.010	P16	0.410	P17	0.011	P18	0.0004
P21	0.009	P22	0.010	P23	0.018	P24	0.004	P25	0.011	P26	0.025	P27	0.011	P28	0.0004
P31	0.012	P32	0.010	P33	0.006	P34	0.004	P35	0.008	P36	0.410	P37	0.0008	P38	0.0004
P41	0.001	P43	0.009	P43	0.063	P44	0.004	P45	0.010	P46	0.025	P47	0.0002	P48	0.0004
P51	0.001	P52	0.009	P53	0.063	P54	0.004	P55	0.010	P56	0.025	P57	0.0002	P58	0.0004
P61	0.0001	P62	0.008	P63	0.038	P64	0.070	P65	0.009	P66	0.050	P67	0.002	P68	0.120
P71	0.037	P72	0.014	P73	0.173	P74	0.078	P75	0.011	P76	0.030	P77	0.037	P78	0.188
P81	0.0003	P82	0.006	P83	0.001	P84	0.004	P85	0.006	P86	0.001	P87	0.0009	P88	0.158
P91	0.582	P92	0.767	P93	0.018	P94	0.004	P95	0.762	P96	0.034	P97	0.0009	P98	0.014
P101	0.026	P102	0.006	P103	0.014	P104	0.004	P105	0.006	P106	0.068	P107	0.016	P108	0.642

3. Cálculo de variación estadística.

Para el cálculo de la variación estadística, se utiliza la ecuación (13), se obtiene valores V_j mostrados en la tabla 23.

Tabla 23. Resultados del método de Variación Estadística.

Numeral de Variación	Valor
V1	0.0694
V2	0.0854
V3	0.0423
V4	0.0185
V5	0.0847
V6	0.1082
V7	0.0081
V8	0.0642

4. Obtención de pesos para cada criterio.

Para poder obtener los pesos de cada criterio, se aplica la ecuación (14), se obtiene los pesos w , agrupados en la tabla 24.

Tabla 24. Obtención de pesos mediante el método de Variación Estadística.

w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8
0.144	0.177	0.088	0.038	0.176	0.224	0.017	0.133

Comparación y selección de valores de métodos de ponderación de pesos

Una vez calculado cada uno de los distintos métodos de ponderación de pesos, se realiza una comparación de resultados, estos valores se agrupan en la tabla 25.

Tabla 25. Datos agrupados de Valores de Ponderación de Pesos.

Método	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8
Variación estadística	0.144	0.177	0.088	0.038	0.176	0.224	0.017	0.133
Desviación estándar	0.024	0.346	0.081	0.0003	0.055	0.002	0.486	0.002
Entropía	0.176	0.414	0.046	0.011	0.096	0.121	0.003	0.129

Debido a que una columna estructural principalmente va a trabajar bajo esfuerzos de compresión y cortante, se escogerá los valores del método de variación estadística, este método de ponderación de pesos en comparación a los demás, obtuvo valores mayores respecto a los criterios más importantes mencionados anteriormente que son w3 y w6 que pertenecen al esfuerzo de compresión y modulo cortante respectivamente, estos valores serán utilizados para el desarrollo de los métodos multicriterio mostrados en la tabla 26.

Tabla 26. Pesos para utilizar en MCDM (Variación Estadística)

w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8
0.144	0.177	0.088	0.038	0.176	0.224	0.017	0.133

Resultados Método de Ponderación Pesos

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de los métodos de ponderación realizados a los criterios de los materiales utilizados en reemplazo al hormigón se muestran en la tabla 27 y evaluados de forma gráfica en la figura 56.

Tabla 27. Resultados obtenidos de ponderaciones de pesos.

Método	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8
Variación estadística	0.144	0.177	0.088	0.038	0.176	0.224	0.017	0.133
Desviación estándar	0.024	0.346	0.081	0.0003	0.055	0.002	0.486	0.002
Entropía	0.176	0.414	0.046	0.011	0.096	0.121	0.003	0.129

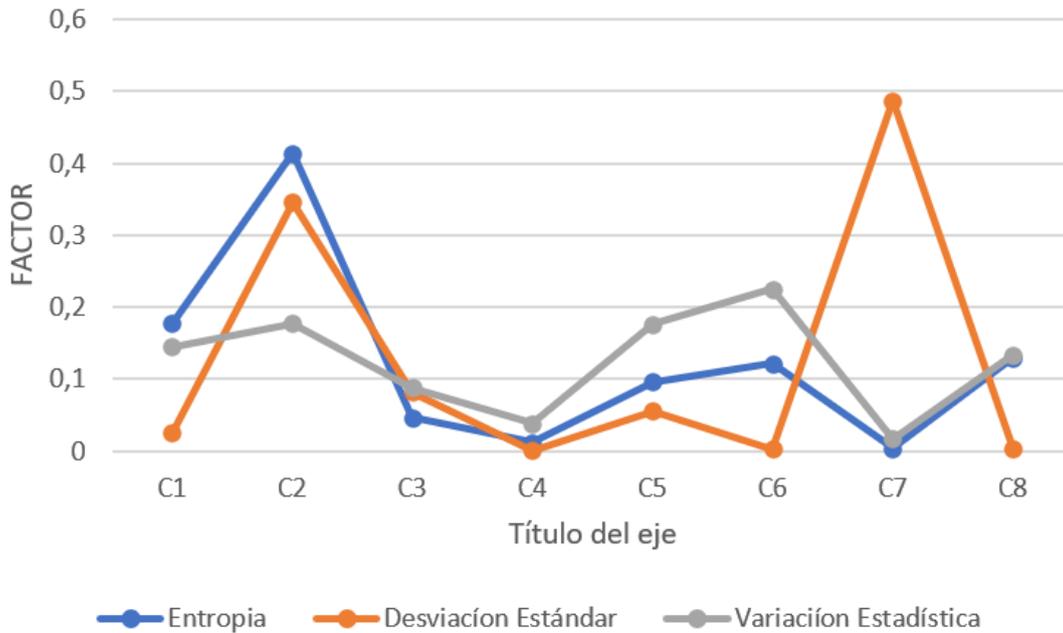


Figura 56. Comparación de métodos de ponderación

En la figura 56 se observa que, en el criterio de módulo de Young (w1) es un el segundo valor más alto otorgado por el método de variación estadística, con un valor de 0.144. Para el criterio de resistencia a la tracción (w2) el valor más alto obtenido es en el método de entropía con un valor de 0.414. para el criterio de resistencia a la compresión (w3), el valor más alto obtenido es del método de variación estadística con un valor de 0.088. Para el criterio del coeficiente de Poisson (w4), vuelve a ser el valor más alto obtenido del método de variación estadística con un resultado de 0.038. Para el criterio de límite de fluencia (w5) se obtiene de igual manera el valor más alto obtenido del método de variación estadística con un resultado de 0.038. Para el criterio del módulo cortante (w6) se obtiene el valor más alto por medio del método de variación estadística con un resultado de 0.224. Para el criterio de la densidad (w7) el valor más

alto es otorgado por el método de la desviación estándar con un resultado de 0.486. Para el criterio de precio el valor más alto es otorgado por el método de variación estadística con un resultado de 0.133. De este modo, al analizar y buscar un material en reemplazo al hormigón para la fabricación de columnas de hormigón, se escogió los distintos valores del método de Variación Estadística ya que otorga los valores más elevados al criterio de más interés que es w_3 (resistencia a la compresión) con un valor de 0.088.

Aplicación de Métodos Multicriterio MCDM

Método VIKOR

1. Construcción de la matriz de decisión.

La tabla 28, muestra la matriz de decisión donde se los datos obtenidos de los valores y criterios de los materiales seleccionados son agrupados, esta matriz será ocupada en el análisis y desarrollo de los métodos multicriterio aplicados en el estudio. Se obtiene la matriz X de datos agrupados.

Tabla 28. Matriz de decisión método VIKOR.

Materiales	Módulo de Young (Gpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Límite de fluencia (Mpa)	Módulo de cortante (Gpa)	Densidad (Kg/m ³)	Precio (USD/Kg)
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)
(M1)	8.65	45	45	0.3	27	0.2	1000	0.45
(M2)	5.4	37.5	30	0.3	34	1	1000	0.45
(M3)	6.05	36	39.7	0.3	21.6	0.2	900	0.45
(M4)	3.8	30	26.5	0.3	26.5	1	850	0.45
(M5)	3.8	30	26.5	0.3	26.5	1	850	0.45
(M6)	3	24.5	48	0.45	24.5	1.5	925	1.1
(M7)	17.5	239.5	80	0.46	40	1.08	700	1.67
(M8)	2.95	18	37.5	0.3	15	0.5	902.5	0.28
(M9)	0.75	0.8	30	0.3	0.7	1.15	902.5	0.28
(M10)	9.95	19	30.5	0.3	15.5	2.04	750	0.58

Matriz de decisión VIKOR

$$X = \begin{pmatrix} 8.65 & 45 & 45 & 0.3 & 27 & 0.2 & 1000 & 0.45 \\ 5.4 & 37.5 & 30 & 0.3 & 34 & 1 & 1000 & 0.45 \\ 6.05 & 36 & 39.7 & 0.3 & 21.6 & 0.2 & 900 & 0.45 \\ 3.8 & 30 & 26.5 & 0.3 & 26.5 & 1 & 850 & 0.45 \\ 3.8 & 30 & 26.5 & 0.3 & 26.5 & 1 & 850 & 0.45 \\ 3 & 24.5 & 48 & 0.45 & 24.5 & 1.5 & 925 & 1.1 \\ 17.5 & 239.5 & 80 & 0.46 & 40 & 1.08 & 700 & 1.67 \\ 2.95 & 18 & 37.5 & 0.3 & 15 & 0.5 & 902.5 & 0.28 \\ 0.75 & 0.8 & 30 & 0.3 & 0.7 & 1.15 & 902.5 & 0.28 \\ 9.95 & 19 & 30.5 & 0.3 & 15.5 & 2.04 & 750 & 0.58 \end{pmatrix}$$

2. Normalización de la matriz de decisión. Mediante la utilización de la ecuación (15), se obtienen los valores r , donde se obtiene la matriz R_{ij} que agrupa los valores normalizados de cada criterio mostrados en la tabla 29.

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} 0.355 & 0.176 & 0.336 & 0.281 & 0.336 & 0.057 & 0.358 & 0.191 \\ 0.221 & 0.146 & 0.224 & 0.281 & 0.424 & 0.285 & 0.358 & 0.191 \\ 0.248 & 0.141 & 0.297 & 0.281 & 0.269 & 0.057 & 0.322 & 0.191 \\ 0.156 & 0.117 & 0.198 & 0.281 & 0.330 & 0.285 & 0.304 & 0.191 \\ 0.156 & 0.117 & 0.198 & 0.281 & 0.330 & 0.285 & 0.304 & 0.191 \\ 0.123 & 0.095 & 0.359 & 0.281 & 0.305 & 0.428 & 0.033 & 0.468 \\ 0.718 & 0.938 & 0.598 & 0.422 & 0.499 & 0.308 & 0.250 & 0.711 \\ 0.121 & 0.070 & 0.280 & 0.431 & 0.197 & 0.142 & 0.323 & 0.119 \\ 0.030 & 0.003 & 0.224 & 0.281 & 0.008 & 0.328 & 0.323 & 0.119 \\ 0.408 & 0.074 & 0.228 & 0.281 & 0.193 & 0.523 & 0.268 & 0.247 \end{pmatrix}$$

Tabla 29. Datos ordenados de la matriz normalizada R_{ij} .

Código	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)
(M1)	0.355	0.176	0.336	0.281	0.336	0.057	0.358	0.191
(M2)	0.221	0.146	0.225	0.281	0.424	0.285	0.358	0.191
(M3)	0.248	0.141	0.297	0.281	0.269	0.057	0.322	0.191
(M4)	0.156	0.117	0.198	0.281	0.330	0.285	0.304	0.191
(M5)	0.156	0.117	0.198	0.281	0.330	0.285	0.304	0.191
(M6)	0.123	0.095	0.359	0.281	0.305	0.428	0.033	0.468
(M7)	0.718	0.938	0.598	0.422	0.499	0.308	0.250	0.711
(M8)	0.121	0.070	0.280	0.431	0.197	0.142	0.323	0.119
(M9)	0.030	0.003	0.224	0.281	0.008	0.328	0.323	0.119
(M10)	0.408	0.074	0.228	0.281	0.193	0.523	0.268	0.247

3. Construcción de la matriz estandarizada de pesos.

Para obtener la matriz estandarizada de pesos se utiliza la ecuación (16), multiplicando el valor ponderado normalizado por los pesos de cada criterio, obteniendo la matriz V_{ij} mostrados en la tabla 30.

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} 0.051 & 0.031 & 0.029 & 0.010 & 0.059 & 0.012 & 0.006 & 0.025 \\ 0.031 & 0.026 & 0.019 & 0.010 & 0.074 & 0.064 & 0.006 & 0.025 \\ 0.035 & 0.025 & 0.026 & 0.010 & 0.047 & 0.012 & 0.005 & 0.025 \\ 0.022 & 0.020 & 0.017 & 0.010 & 0.058 & 0.064 & 0.005 & 0.025 \\ 0.022 & 0.020 & 0.017 & 0.010 & 0.058 & 0.064 & 0.005 & 0.025 \\ 0.017 & 0.017 & 0.031 & 0.016 & 0.053 & 0.096 & 0.005 & 0.062 \\ 0.103 & 0.166 & 0.052 & 0.016 & 0.087 & 0.069 & 0.004 & 0.095 \\ 0.017 & 0.012 & 0.024 & 0.010 & 0.032 & 0.0321 & 0.005 & 0.015 \\ 0.004 & 0.0005 & 0.019 & 0.010 & 0.001 & 0.073 & 0.005 & 0.015 \\ 0.058 & 0.013 & 0.020 & 0.010 & 0.034 & 0.131 & 0.004 & 0.032 \end{pmatrix}$$

Tabla 30. Matriz estandarizada de pesos VIKOR.

Código	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)
(M1)	0.051	0.031	0.029	0.010	0.059	0.012	0.006	0.025
(M2)	0.031	0.026	0.019	0.010	0.074	0.064	0.006	0.025
(M3)	0.031	0.025	0.026	0.010	0.047	0.012	0.005	0.025
(M4)	0.022	0.020	0.017	0.010	0.058	0.064	0.005	0.025
(M5)	0.022	0.020	0.017	0.010	0.058	0.064	0.005	0.025
(M6)	0.017	0.017	0.031	0.016	0.053	0.096	0.005	0.062
(M7)	0.103	0.166	0.052	0.016	0.087	0.069	0.004	0.095
(M8)	0.017	0.012	0.024	0.010	0.032	0.0321	0.005	0.015
(M9)	0.004	0.0005	0.019	0.010	0.001	0.073	0.005	0.015
(M10)	0.058	0.013	0.020	0.010	0.034	0.131	0.004	0.032

4. Cálculo de resultados positivos y negativos de forma ideal.

Se emplea la ecuación (15) y (16) donde se extrae los criterios f. Se toma el valor en los criterios C donde el valor más alto es el más significativo y el valor mínimo será el valor más importante acorde con lo que se requiera, siendo la densidad y precio los valores mínimos a considerar.

Para C1 (mayor es mejor)

Para C2 (mayor es mejor)

Para C3 (mayor es mejor)

Para C4 (mayor es mejor)

Para C5 (mayor es mejor)

Para C6 (mayor es mejor)

Para C7 (menor es mejor)

Para C8 (menor es mejor)

5. Cálculo de soluciones óptimos (U_i); (R_i).

Las soluciones optimas dependen de su relevancia y covalencia denominadas (U_i) y (R_i) respectivamente. Se aplica la ecuación (19), para obtener los valores (U_i) agrupados de cada matriz. Para obtener los valores (R_i), se utiliza la ecuación (20), de donde se obtienen los distintos resultados representados en la tabla 31.

Tabla 31. Resultados intermedios VIKOR.

Soluciones optimas U	Valor	Soluciones optimas R	Valor	Soluciones optimas V_{ij}	Valor
U_1	0.566	R1	0.224	V1	0.977
U_2	0.496	R2	0.150	V2	0.348
U_3	0.643	R3	0.224	V3	0.987
U_4	0.563	R4	0.155	V4	0.404
U_5	0.563	R5	0.155	V5	0.404
U_6	0.363	R6	0.159	V6	0.411
U_7	-0.016	R7	0.117	V7	0
U_8	0.687	R8	0.188	V8	0.692
U_9	0.716	R9	0.177	V9	0.607
U_10	0.427	R10	0.163	V10	0.452
$U_i \text{ max}=0.716$ $U_i \text{ min}= -0.016$ $R \text{ max}= 0.224$ $R \text{ min}=0.117$ $\alpha = 0.11$					

Mediante la ecuación (21) se obtiene los valores denominados V_{ij} , se utilizan los valores U y R para poder reemplazarlos en la ecuación. Los resultados V obtenidos son

los valores finales del método VIKOR que se ubican en el ranking de la tabla 32, donde el valor más cercano a cero será el ganador.

6. Ranking

Tabla 32. Ranking VIKOR

Alternativa	Vi	Ranking
M1	0.977	9
M2	0.348	2
M3	0.987	10
M4	0.404	3
M5	0.404	3
M6	0.411	5
M7	0	1
M8	0.692	8
M9	0.607	7
M10	0.452	6

Resultados Método VIKOR

Tabla 33. Resultado método VIKOR

Alternativa	Ranking
Tablero de fibra de madera extraduro perpendicular (M1)	9
Tablero de fibra de madera extraduro horizontal (M2)	2
Tablero de fibra de madera duro perpendicular (M3)	10
Tablero de fibra de madera duro horizontal (M4)	3
Tablero de cartulina pensada (M5)	3
Tablero de papel a base de celulosa (M6)	5
Bambú (M7)	1
Panel de madera dura paralelo (M8)	8
Panel de madera dura perpendicular (M9)	7
Panel de madera Plywood (10)	6

En la tabla 33 y figura 57, se detalla el ranking obtenido de los diferentes materiales seleccionados para el análisis, el método VIKOR otorga la primera posición al bambú (M7) y como segundo lugar lo otorga al tablero de fibra de madera extraduro con fibras perpendiculares al tablero (M2). La razón de estas posiciones otorgadas a estos materiales por el método VIKOR, es que este método se basa en la sucesión de tareas matemáticas difusas, otorgando cierto grado de preferencia a los materiales más cercanos a una solución ideal.

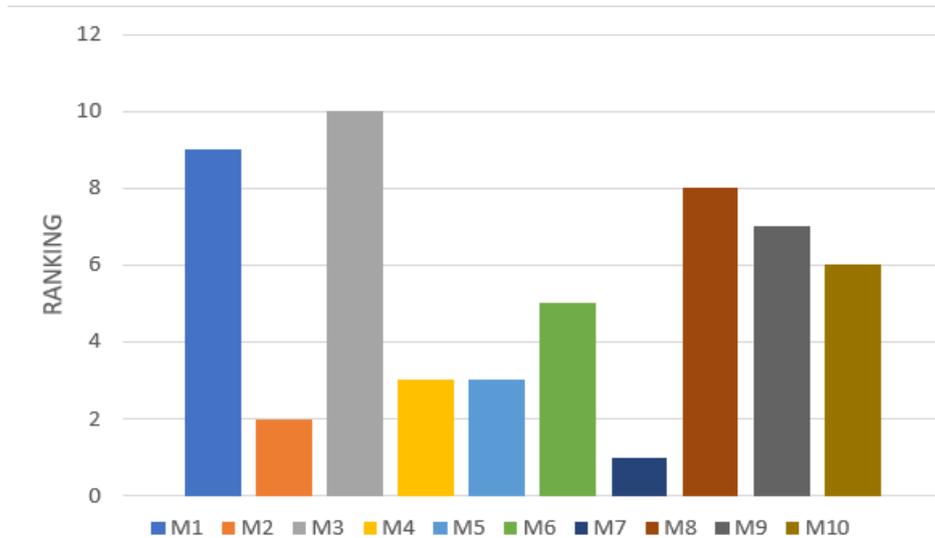


Figura 57. Ranking método VIKOR

Método TOPSIS

1. Construcción de matriz de decisión.

Se utiliza la misma matriz de decisión del método VIKOR.

2. Normalización de la matriz de decisión.

Se emplea la misma matriz normalizada del método VIKOR.

3. Construcción de la matriz estandarizada de pesos.

Se emplea la misma matriz estandarizada del de pesos del método VIKOR.

4. Determinación de soluciones ideales.

Mediante la ecuación (22) y (23) se obtiene valores de soluciones ideales agrupadas de la tabla 34.

Tabla 34. Matriz de soluciones ideales y negativas TOPSIS

Solución ideal positiva	0.103	0.166	0.05	0.016	0.087	0.0131	0.004	0.015
Solución ideal negativa	0.004	0.00005	0.017	0.010	0.001	0.012	0.006	0.095

5. Cálculo de diferencias entre mediciones.

Para el cálculo de la diferencia entre mediciones, se ocupa las ecuaciones (24) y (25), se obtiene los valores S positivos y negativos respectivamente, la matriz representada en la tabla 35 muestra los valores obtenidos.

Tabla 35. Distancias intermedias de resultados positivos y negativos TOPSIS

Código	Distancia solución positiva	Distancia solución negativa	Proximidad a la solución
M1	0.1911	0.106	0.358
M2	0.175	0.119	0.404
M3	0.202	0.092	0.313
M4	0.185	0.106	0.365
M5	0.185	0.106	0.365
M6	0.186	0.107	0.364
M7	0.100	0.222	0.688
M8	0.211	0.089	0.296
M9	0.221	0.099	0.310
M10	0.172	0.148	0.462

6. Cálculo a la solución próxima ideal positivo.

Mediante la ecuación (26), se obtienen los valores C, son valores obtenidos para cada material que son clasificados para el ranking y obtener un material ganador. Estos datos se agrupan en la tabla 36 (proximidad a la solución ideal).

7. Ranking

El valor más alto obtenido mediante los valores C, será posicionado como el mejor material del método TOPSIS, la tabla 35 muestra el Ranking Obtenido.

Tabla 36. Ranking método TOPSIS

Código	Solución ideal positiva (C)	Ranking
M1	0.358	6
M2	0.404	3
M3	0.313	7
M4	0.365	4
M5	0.365	4
M6	0.364	5
M7	0.688	1
M8	0.296	9
M9	0.310	8
M10	0.462	2

Resultado método TOPSIS

Tabla 37. Resultados método TOPSIS

Alternativa	Ranking
Tablero de fibra de madera extraduro perpendicular (M1)	6
Tablero de fibra de madera extraduro horizontal (M2)	3
Tablero de fibra de madera duro perpendicular (M3)	7
Tablero de fibra de madera duro horizontal (M4)	4
Tablero de cartulina pensada (M5)	4
Tablero de papel a base de celulosa (M6)	5
Bambú (M7)	1
Panel de madera dura paralelo (M8)	9
Panel de madera dura perpendicular (M9)	8
Panel de madera Plywood (10)	2

En la tabla 37 y figura 58, se muestra el ranking obtenido de cada uno de los diferentes materiales por el método TOPSIS, se observa que el primer lugar es otorgado al bambú (M7) y segundo lugar lo obtiene el panel de madera Plywood (M10). Se puede observar que tanto el método VIKOR y el método TOPSIS le otorga el primer lugar al bambú. Ambos métodos aplican las mismas consideraciones matemáticas difusa con la comparación de que los rankings obtenidos de los distintos materiales varían en su posición, esto se debe a que el método TOPSIS analiza la eficiencia de cada alternativa,

siendo el bambú el material más eficiente para su aplicación por su alta resistencia a la compresión.

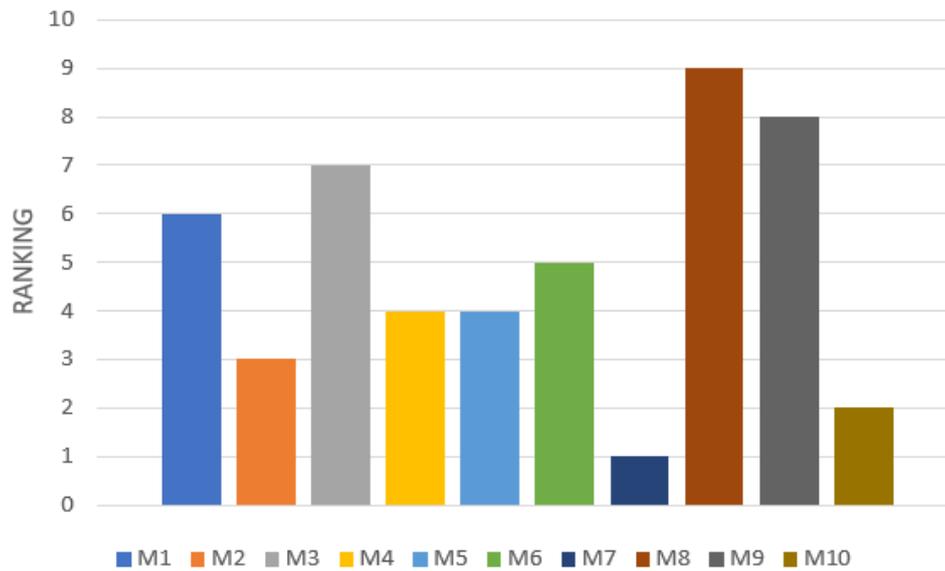


Figura 58. Ranking método TOPSIS

Método DOMINIC

1. Construcción de la matriz de decisión.

Se utiliza la matriz de decisión del método VIKOR mostrada en la tabla 38.

Tabla 38. Matriz de decisión método DOMINIC

Materiales	Módulo de Young (Gpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Límite de fluencia (Mpa)	Módulo de cortante (Gpa)	Densidad (Kg/m ³)	Precio (USD/Kg)
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)
(M1)	8.65	45	45	0.3	27	0.2	1000	0.45
(M2)	5.4	37.5	30	0.3	34	1	1000	0.45
(M3)	6.05	36	39.7	0.3	21.6	0.2	900	0.45
(M4)	3.8	30	26.5	0.3	26.5	1	850	0.45
(M5)	3.8	30	26.5	0.3	26.5	1	850	0.45
(M6)	3	24.5	48	0.45	24.5	1.5	925	1.1
(M7)	17.5	239.5	80	0.46	40	1.08	700	1.67
(M8)	2.95	18	37.5	0.3	15	0.5	902.5	0.28
(M9)	0.75	0.8	30	0.3	0.7	1.15	902.5	0.28
(M10)	9.95	19	30.5	0.3	15.5	2.04	750	0.58

2. Construcción de la matriz ponderada.

En la construcción de la matriz, se otorga grados de prioridad a cada uno de los criterios, se utilizan palabras que tendrán un rango de valores de la siguiente manera otorgando un código para cada uno de ellos:

EXCELENTE = 10 (E)

BUENO = 7 (B)

RANOSABLE = 5 (R)

POBRE = 1 (P)

El rango de valores es agrupado en la matriz de la tabla 39.

Tabla 39. Matriz de ponderación DOMINIC

	Prioridad	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
C1	ALTA	B	R	B	P	P	P	E	P	P	E
C2	ALTA	B	B	B	R	R	R	E	P	P	P
C3	ALTA	R	R	R	R	B	B	E	B	R	B
C4	MODERADO	B	B	B	B	B	E	E	B	B	B
C5	ALTA	B	E	R	B	B	R	E	P	P	R
C6	ALTA	P	B	P	B	B	E	B	P	E	E
C7	MODERADO	P	P	R	B	B	R	E	R	R	E
C8	MODERADO	B	B	B	B	B	P	P	E	E	R

Se procede con el reemplazo de los criterios otorgados por los valores correspondientes mostrados en la tabla 40.

Tabla 40. Matriz de ponderación DOMINIC

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
C1	7	5	7	1	1	1	10	1	1	10
C2	7	7	7	5	5	5	10	1	1	1
C3	5	5	5	5	7	7	10	5	5	7
C4	7	7	7	7	7	10	10	5	7	7

C5	7	5	5	7	7	5	10	1	1	5
C6	1	7	1	7	7	10	7	1	10	10
C7	1	1	5	7	7	5	10	5	5	10
C8	7	7	7	7	7	1	1	10	10	5

3. Normalización de la matriz de ponderación.

Mediante la ecuación (27) se obtiene los valores agrupados de la matriz mostrada en la tabla 41.

Tabla 41. Matriz de ponderación normalizada DOMINIC

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9	M10
C1	0.010	0.722	1.010	0.144	0.144	0.144	1.443	0.144	0.144	1.443
C2	1.243	1.243	1.243	0.888	0.888	0.888	1.775	0.178	0.178	0.178
C3	0.440	0.440	0.440	0.440	0.616	0.616	0.880	0.440	0.440	0.616
C4	0.270	0.270	0.270	0.270	0.270	0.386	0.386	0.193	0.270	0.270
C5	1.233	0.881	0.881	1.233	1.233	0.881	1.761	0.176	0.176	0.881
C6	0.225	1.575	0.225	1.575	1.575	2.249	1.575	0.225	2.249	2.249
C7	0.017	0.017	0.085	0.119	0.119	0.085	0.170	0.085	0.085	0.170
C8	0.934	0.934	0.934	0.934	0.934	0.133	0.133	1.335	1.335	0.667

4. Cálculo de valores finales

Para el paso final, se emplea la ecuación (28), se obtienen los valores V_i , los mismos que corresponden para determinar el ranking de los materiales. Los valores son agrupados en la tabla 42.

Tabla 42. Resultados intermedios DOMINIC

Material	Valores
M1	5.371
M2	6.080
M3	5.087
M4	5.603
M5	5.779
M6	5.382
M7	8.123
M8	2.775
M9	4.877
M10	6.474

5. Ranking

Donde el resultado con un valor mayor es el ganador mostrado en la tabla 43.

Tabla 43. Ranking método DOMINIC

Material	Valores	Ranking
M1	5.371	7
M2	6.080	3
M3	5.087	8
M4	5.603	5
M5	5.779	4
M6	5.382	6
M7	8.123	1
M8	2.775	10
M9	4.877	9
M10	6.474	2

Resultado método DOMINIC

Tabla 44, Resultados método DOMINIC

Alternativa	Ranking
Tablero de fibra de madera extraduro perpendicular (M1)	7
Tablero de fibra de madera extraduro horizontal (M2)	3
Tablero de fibra de madera duro perpendicular (M3)	8
Tablero de fibra de madera duro horizontal (M4)	5
Tablero de cartulina pensada (M5)	4
Tablero de papel a base de celulosa (M6)	6
Bambú (M7)	1
Panel de madera dura paralelo (M8)	10
Panel de madera dura perpendicular (M9)	9
Panel de madera Plywood (10)	2

En la tabla 44 y figura 59, se muestra el ranking alcanzado por los materiales mediante la aplicación del método DOMINIC, este método nuevamente otorga el primero lugar al Bambú (M7) y como segundo lugar al panel de madera Plywood. Los resultados obtenidos mediante este método se deben a que los resultados obtenidos, es la sumatoria de los valores otorgados a los criterios, el cual tienen una valoración en función a la cualidad buscada en el material de cada criterio. De este modo el Bambú en comparación al panel de madera Plywood, tiene una resistencia a la compresión mayor.

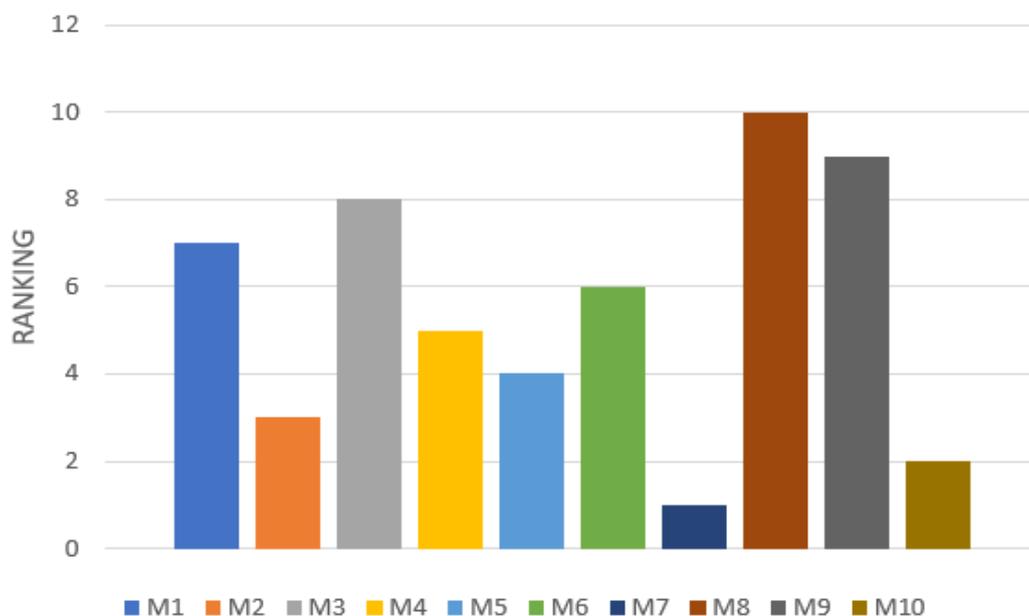


Figura 59. Ranking método DOMINIC

Método COPRAS

1. Construcción de la matriz de decisión.

Para la construcción de la matriz se utiliza la misma matriz de decisión del método VIKOR mostrada en la tabla 45.

Tabla 45. Matriz de decisión método COPRAS

Materiales	Módulo de Young (Gpa)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Resistencia a la compresión (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Límite de fluencia (Mpa)	Módulo de cortante (Gpa)	Densidad (Kg/m ³)	Precio (USD/Kg)
(M)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)
(M1)	8.65	45	45	0.3	27	0.2	1000	0.45
(M2)	5.4	37.5	30	0.3	34	1	1000	0.45
(M3)	6.05	36	39.7	0.3	21.6	0.2	900	0.45
(M4)	3.8	30	26.5	0.3	26.5	1	850	0.45
(M5)	3.8	30	26.5	0.3	26.5	1	850	0.45
(M6)	3	24.5	48	0.45	24.5	1.5	925	1.1
(M7)	17.5	239.5	80	0.46	40	1.08	700	1.67
(M8)	2.95	18	37.5	0.3	15	0.5	902.5	0.28
(M9)	0.75	0.8	30	0.3	0.7	1.15	902.5	0.28
(M10)	9.95	19	30.5	0.3	15.5	2.04	750	0.58

2. Cálculo de la matriz normalizada

Para poder normalizar la matriz se usa la ecuación (29), donde se obtiene la matriz normalizada R_{ij} , sus valores son agrupados en la tabla 46.

$$R_{ij} = \begin{pmatrix} 0.139 & 0.093 & 0.114 & 0.090 & 0.116 & 0.020 & 0.113 & 0.073 \\ 0.087 & 0.078 & 0.076 & 0.090 & 0.146 & 0.103 & 0.113 & 0.073 \\ 0.097 & 0.074 & 0.100 & 0.090 & 0.093 & 0.020 & 0.102 & 0.073 \\ 0.061 & 0.062 & 0.067 & 0.090 & 0.114 & 0.103 & 0.096 & 0.073 \\ 0.061 & 0.062 & 0.067 & 0.090 & 0.114 & 0.103 & 0.096 & 0.073 \\ 0.048 & 0.051 & 0.121 & 0.135 & 0.105 & 0.155 & 0.105 & 0.178 \\ 0.282 & 0.498 & 0.203 & 0.138 & 0.172 & 0.111 & 0.079 & 0.271 \\ 0.047 & 0.037 & 0.095 & 0.090 & 0.064 & 0.051 & 0.102 & 0.045 \\ 0.012 & 0.001 & 0.076 & 0.090 & 0.003 & 0.118 & 0.102 & 0.045 \\ 0.160 & 0.039 & 0.077 & 0.090 & 0.067 & 0.210 & 0.085 & 0.094 \end{pmatrix}$$

Tabla 46. Matriz normalizada COPRAS

Código	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C645)	(C6)	(C7)	(C8)
(M1)	0.139	0.093	0.114	0.090	0.116	0.020	0.113	0.073
(M2)	0.087	0.078	0.076	0.090	0.146	0.103	0.113	0.073
(M3)	0.097	0.074	0.100	0.090	0.093	0.020	0.102	0.073
(M4)	0.061	0.062	0.067	0.090	0.114	0.103	0.096	0.073
(M5)	0.061	0.062	0.067	0.090	0.114	0.103	0.096	0.073
(M6)	0.048	0.051	0.121	0.135	0.105	0.155	0.105	0.178
(M7)	0.282	0.498	0.203	0.138	0.172	0.111	0.079	0.271
(M8)	0.047	0.037	0.095	0.090	0.064	0.051	0.102	0.045
(M9)	0.012	0.001	0.076	0.090	0.003	0.118	0.102	0.045
(M10)	0.160	0.039	0.077	0.090	0.067	0.210	0.085	0.094

3. Cálculo de la matriz estandarizada de pesos.

Para normalizar la matriz, se utiliza la ecuación (230), obtenemos la matriz

V_{ij} . Los valores agrupados se muestran en la tabla 47.

Tabla 47. Matriz estandarizada de pesos V_{ij}

Código	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
M1	0.020	0.016	0.010	0.003	0.020	0.004	0.001	0.009
M2	0.012	0.013	0.006	0.003	0.025	0.023	0.001	0.009
M3	0.014	0.0130	0.008	0.003	0.016	0.004	0.001	0.009
M4	0.008	0.011	0.008	0.003	0.020	0.023	0.001	0.009
M5	0.008	0.011	0.008	0.003	0.020	0.023	0.001	0.009
M6	0.006	0.009	0.10	0.005	0.018	0.034	0.001	0.023
M7	0.040	0.088	0.017	0.005	0.030	0.025	0.001	0.036
M8	0.006	0.006	0.008	0.003	0.011	0.011	0.001	0.006
M9	0.001	0.0002	0.006	0.003	0.0005	0.026	0.001	0.006
M10	0.023	0.007	0.006	0.003	0.011	0.047	0.001	0.012

4. Cálculo de pesos normalizados

Para ellos se emplea las ecuaciones (31) y (32), se obtiene pesos positivos y negativos normalizados agrupados en la tabla 48.

Tabla 48. Pesos positivos y negativos normalizados COPRAS

Código	S+	S-
M1	0.087	0.009
M2	0.097	0.009
M3	0.072	0.009
M4	0.084	0.009
M5	0.084	0.009
M6	0.111	0.023
M7	0.245	0.036
M8	0.056	0.006
M9	0.047	0.006
M10	0.113	0.012

5. Cálculo de prioridades relativas

Mediante la ecuación (33) se obtienen los valores agrupados de la tabla 49.

$$\sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}} = 991.64$$

Tabla 49. Prioridades relativas COPRAS

	Qi
Q1	0.101
Q2	0.111
Q3	0.086
Q4	0.098
Q5	0.098
Q6	0.116
Q7	0.249
Q8	0.078
Q9	0.069
Q10	0.124
MAX Qi	0.249

6. Cálculo del rendimiento por niveles

Mediante la aplicación de la ecuación (34), obtenemos el valor en porcentaje del rendimiento, con estos valores se puede determinar el ranking de los materiales mostrados en la tabla 50. Donde el valor mayor será el ganador.

Tabla 50. Ranking Método COPRAS

Código	Valores	Ranking
M1	40.521	5
M2	44.623	4
M3	34.555	7
M4	39.295	6
M5	39.295	6
M6	16.848	3
M7	100	1
M8	31.460	8
M9	28.878	9
M10	49.929	2

Resultado método COPRAS

Tabla 51. Resultados método COPRAS

Alternativa	Ranking
Tablero de fibra de madera extraduro perpendicular (M1)	5
Tablero de fibra de madera extraduro horizontal (M2)	4
Tablero de fibra de madera duro perpendicular (M3)	7
Tablero de fibra de madera duro horizontal (M4)	6
Tablero de cartulina pensada (M5)	6
Tablero de papel a base de celulosa (M6)	3
Bambú (M7)	1
Panel de madera dura paralelo (M8)	8
Panel de madera dura perpendicular (M9)	9
Panel de madera Plywood (M10)	2

En la tabla 51 y figura 60, se muestra el ranking alcanzado mediante el estudio a partir del método COPRAS, se observa nuevamente que la primera posición lo obtiene el Bambú (M7) y en segundo lugar el panel de madera Plywood (M10) la razón de estos resultados es porque el método COPRAS utiliza umbrales ideales y no ideales para poder obtener una solución óptima donde influyen de una manera fuerte los valores obtenidos mediante la ponderación de pesos, donde el valor más alto obtenido es el criterio de resistencia a la compresión (w_3) que es la característica más elevada correspondiente a este material.

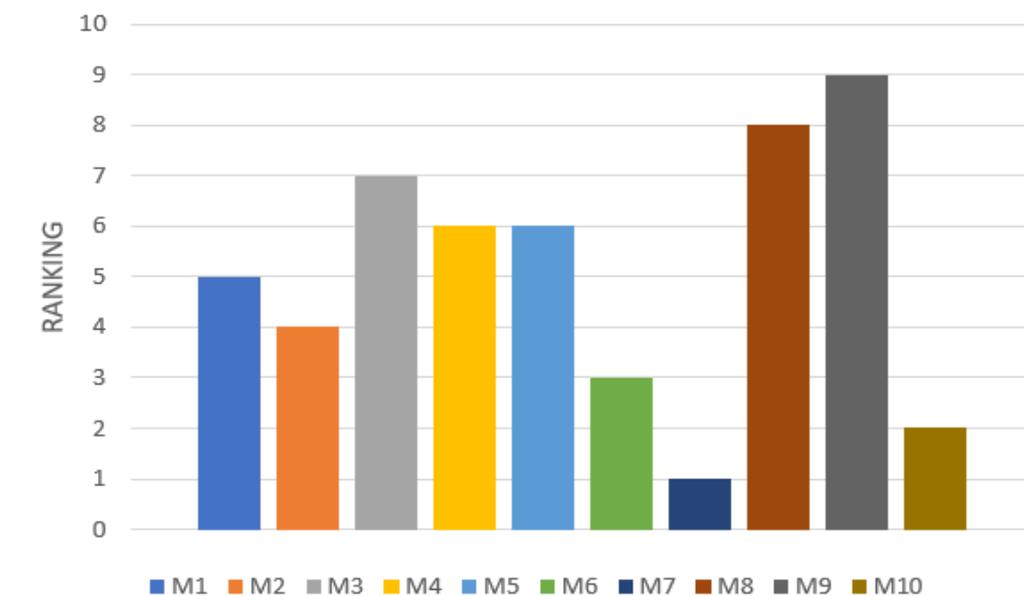


Figura 60. Ranking método COPRAS

Comparación de resultados Métodos Multicriterio (MCDM)

El primer método utilizado, es el método VIKOR donde el material que obtuvo la mejor valoración es el bambú, este método da una valoración mediante soluciones óptimas a los materiales que obtenga un valor cercano a cero. El valor obtenido del bambú es cero, el segundo material es el tablero de papel a base de celulosa con un valor de 0.470 y en tercer lugar es el tablero de madera extraduro con un valor de 0.502, se obtiene un empate en la quinta posición del material de fibra de madera duro y el tablero de cartulina prensada, esto se debe a que los dos materiales tienen características similares, estos valores se muestran en la tabla 32. El segundo análisis realizado es el método Topis que genera una valoración cambiante respecto a los tres materiales mencionados, donde los valores más altos obtenidos, serán los materiales mejor valorados por este método, en la tabla 36 se puede observar que el bambú obtiene el valor más alto de 0.688, segundo lugar lo obtiene el panel de madera Plywood con un valor de 0.462 y en tercer lugar se ubica el tablero de madera extraduro con un valor de 0.404, de igual manera se obtiene un empate, pero esta vez en la cuarta posición que se ubican el tablero de fibra de madera duro y el tablero de cartulina prensada. El método Dominic es el tercer método utilizado teniendo como ganador de igual manera al bambú con 8.1232 seguido del panel de madera Plywood con 6.474 y en tercer lugar el tablero de fibra de madera extraduro con 6.080, en este método no se obtienen empates a diferencia de los otros dos métodos, esto se debe a la valoración en cuanto al nivel de importancia de cada uno de los criterios asignados a cada material. Por último, el método Copras de igual manera es el bambú el vencedor seguido por el tablero de madera Plywood y el tablero de papel a base de celulosa, en este método al igual que los dos primeros métodos se obtiene un empate en sexto lugar del tablero de fibra de madera duro y el tablero de cartulina prensada.

Observando los resultados obtenidos mediante la aplicación de los distintos métodos multicriterio mencionados, se determina que el material ganador es el Bambú, siendo el material ganador en todos los métodos aplicados como detalla la tabla 52 y figura 61.

Tabla 52. Comparación de Ranking MCDM

Alternativa	VIKOR	TOPSIS	DOMINIC	COPRAS
Tablero de fibra de madera extraduro perpendicular (M1)	8	6	7	5
Tablero de fibra de madera extraduro horizontal (M2)	3	3	3	4
Tablero de fibra de madera duro perpendicular (M3)	9	7	8	7
Tablero de fibra de madera duro horizontal (M4)	5	4	5	6
Tablero de cartulina pensada (M5)	5	4	4	6
Tablero de papel a base de celulosa (M6)	2	5	6	3
Bambú (M7)	1	1	1	1
Panel de madera dura paralelo (M8)	7	9	10	8
Panel de madera dura perpendicular (M9)	6	8	9	9
Panel de madera Plywood (10)	4	2	2	2

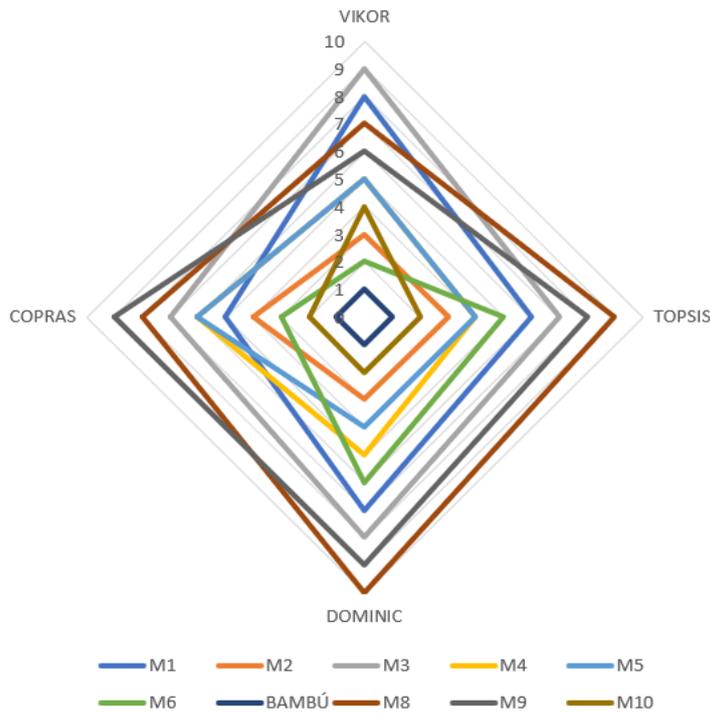


Figura 61. Comparación de resultados MCDM

Resultados de correlación de SPEARMAN

Tabla 53. Correlación de Spearman en resultados MCDM

	VIKOR	TOPSIS	COPRAS	DOMINIC
VIKOR	-	0.812	0.812	0.742
TOPSIS	0.812	-	0.903	0.966
COPRAS	0.812	0.903	-	0.833
DOMINIC	0.742	0.966	0.833	-
Costo FOM₁	-0.806	-0.696	-0.696	-0.7
CO₂ FOM₂	0.154	0.348	0.530	0.333

En la tabla 53 y figura 62 respectivamente, se observan los datos obtenidos de la correlación de Spearman en los resultados de MCDM e índices de rendimiento (FOM) de forma emparejada. Las combinaciones muestran resultados ascendentes desde un promedio de 0.742 hasta 0.996 lo que indica una correlación positiva considerable a una correlación positiva perfecta como lo indica la tabla 54. Por otro lado, el grado de asociación obtenida mediante índices de rendimiento acorde a costo y huella de CO₂ mínimo con respecto a los diferentes Ranking obtenidos de cada MCDM de los materiales. Con el fin de poder observar la correlación existente entre ellos, denota que en cuanto a costo y MCDM los valores se encuentran en un rango de -0.696 a -0.806 donde muestran una correlación negativa considerable a muy fuerte. En cuanto a huella de CO₂ muestra valores en un rango de 0.154 a 0.530 lo que indican una correlación positiva media.

Tabla 54. Grado de relación según coeficiente de correlación

RANGO	CORRELACIÓN
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0.00	No existe correlación
+0.01 a+ 0.10	Correlación positiva débil

Continuación tabla 54

RANGO	CORRELACIÓN
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

Fuente: (Mondragón Barrera, 2014)

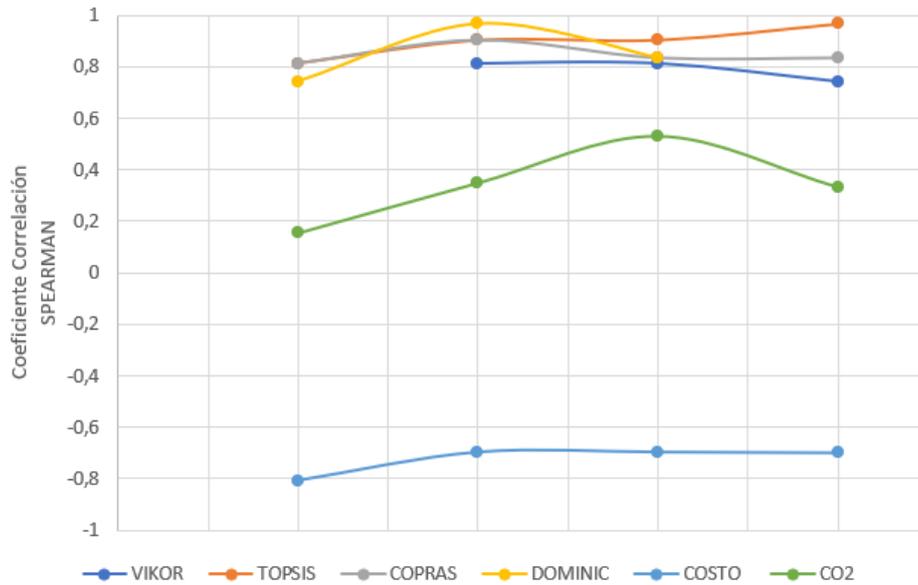


Figura 62. Analisis de correlación de SPEARMAN

Dado que una correlación expresa el grado de asociación entre dos variables, se pueden clasificar de la siguiente manera como muestra la figura 63. Cuando no existe ninguna relación y la nube de puntos están distribuidas al azar, se dice que no están correlacionadas (Nula). (Martínez-González & Faulín Fajardo, 2006)

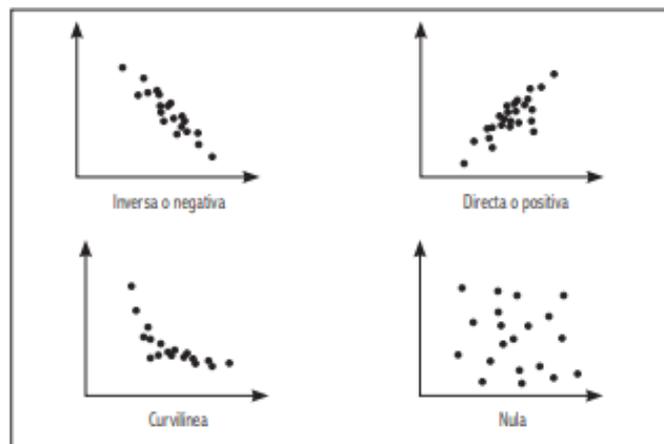


Figura 63. Tipos de correlaciones.

Fuente: (Mondragón Barrera, 2014)

En este sentido, la correlación entre métodos posee una tendencia positiva o directa, es decir que, los resultados son positivos y directamente proporcionales, lo que significa que los métodos COPRAS, DOMINIC, VIKOR y TOPSIS le otorgan el primero puesto al bambú. De esta manera se observa la consistencia de los resultados de los MCDM. La correlación de índices de rendimiento FOM_2 con los MCDM posee una tendencia positiva, lo que indica que el grado de asociación entre índices le otorgan el primer lugar al bambú como material con menor huella de CO_2 . La correlación existente FOM_1 y MCDM posee una tendencia negativa, lo que indica que el grado de asociación entre índices es inversa por lo que no se le otorga al bambú el primero lugar como material más económico, esto se debe a que se toma a consideración el costo del bambú como USD/Kg mas no como precio metro lineal siendo de esta manera un material más económico en comparación a los demás.

Resultados simulación mecánica

Se realizó la simulación mecánica a una columna estructural, se obtuvieron distintos resultados referentes al comportamiento de la columna aplicando una carga de 4.15, 3.40 y 0.38 toneladas, se realiza la comparación de las tres cargas obtenidas para poder realizar una comparación más amplia; se obtiene distintos valores en cuanto a esfuerzos de Von Mises, deformación y factor de seguridad sometidos a una carga de compresión, estos resultados se mostrarán comparando el CAD 3D de su distinta geometría ejecutada a una columna de hormigón (material base) vs columna de bambú (material ganador en M.C.D.M.)

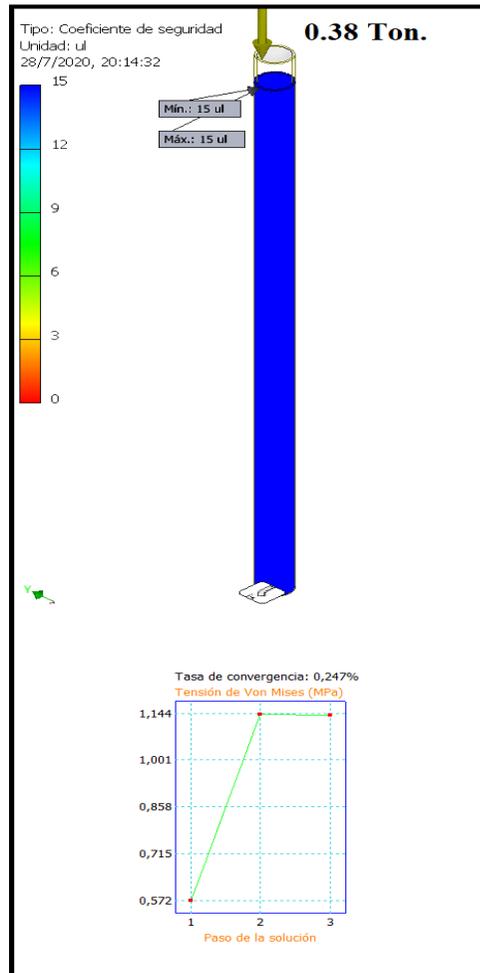
Resultados de factor de seguridad

El factor de seguridad garantiza el sistema como tal; si se tiene que evitar una falla estructural, las cargas a las que es sometida una estructura o elemento, debe soportar una carga mayor a las que va a ser sometida la estructura cuando ya esté en

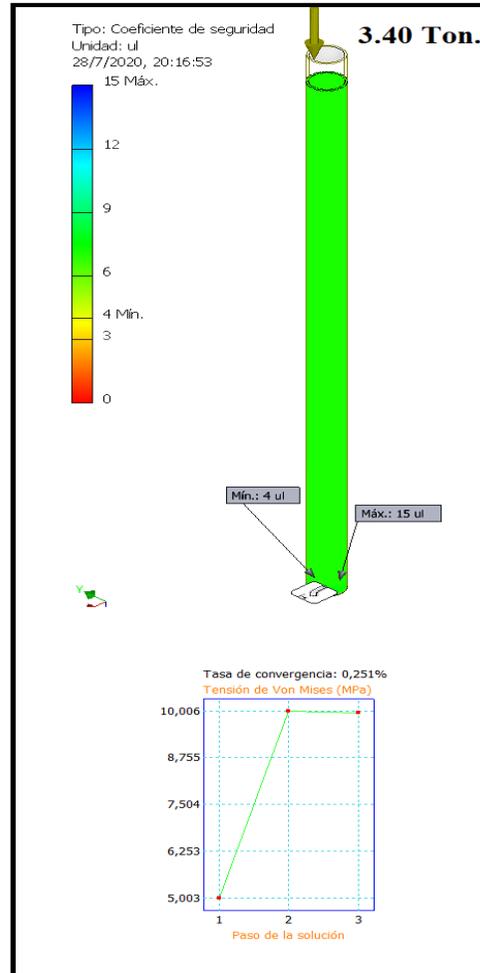
servicio, es decir, la resistencia real de una estructura o elemento debe ser mayor que la resistencia requerida. Comúnmente se busca un factor de seguridad mayor a 1 para que una estructura no falle o colapse, esto puede ocurrir cuando las deformaciones causadas por las cargas aplicadas son tan grandes ocasionando que la estructura ya no pueda realizar cada una de sus funciones. La tabla 55 muestra los valores obtenidos de los distintos factores de seguridad máximos y mínimos aplicados a los dos materiales y las figuras 64 y 65 los FS de cada elemento en simulación.

Tabla 55. Factor de seguridad de cada elemento

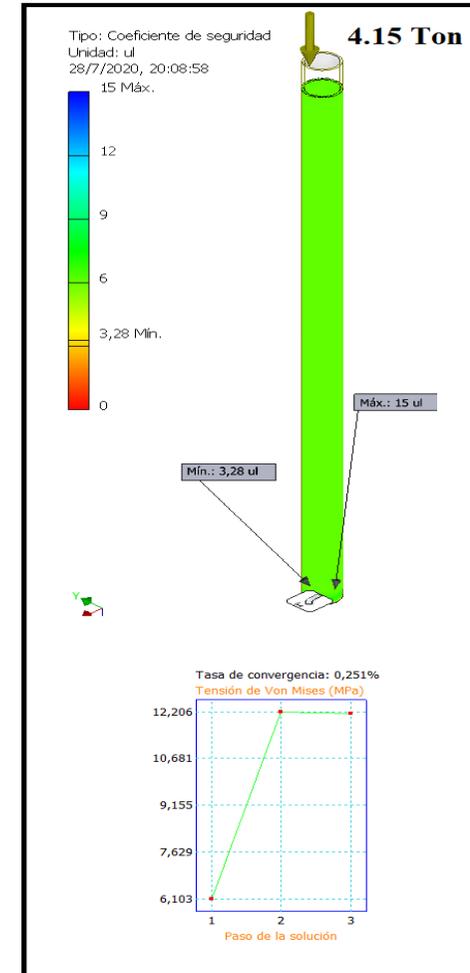
Material	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón
Esfuerzo (Ton)	0.38	0.38	3.40	3.40	4.15	4.15
Máximo	15	15	15	2.236	15	2.028
Mínimo	15	2.65	4	0.52	3.28	0.471



(a)

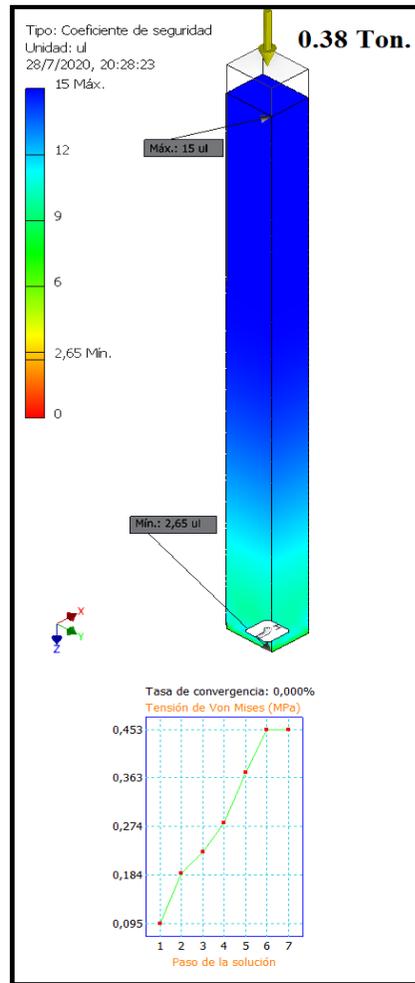


(b)

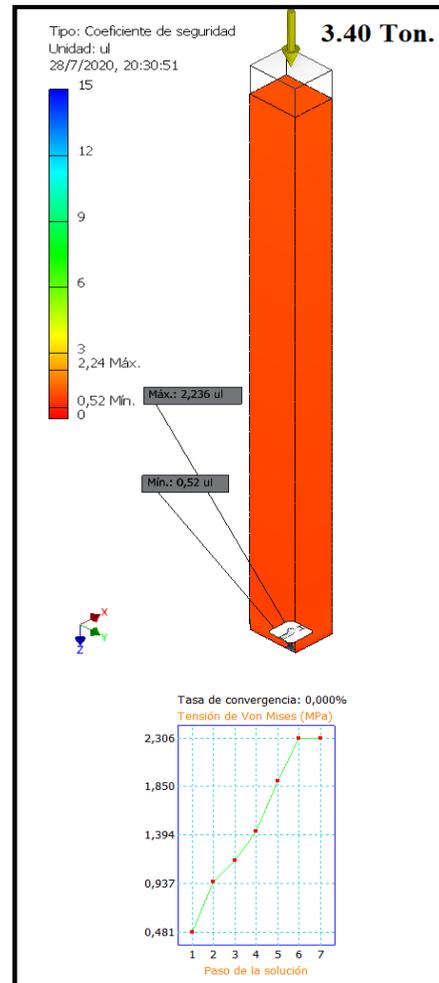


(c)

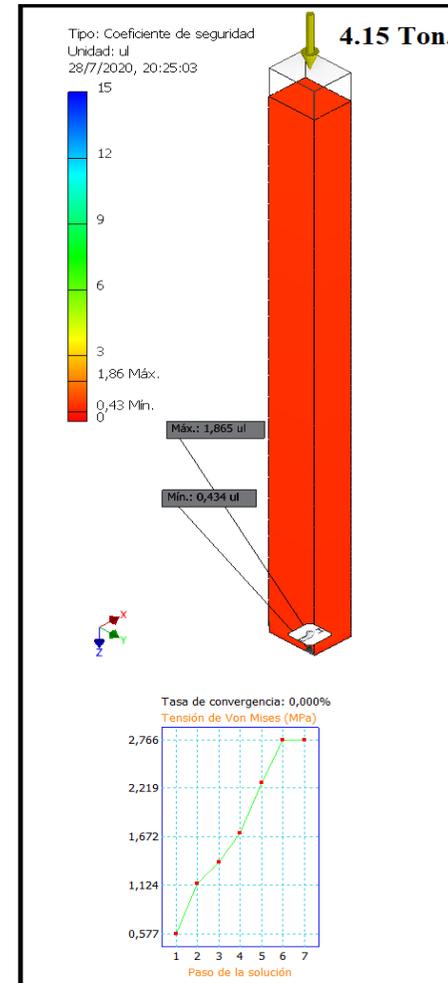
Figura 64. Factor de seguridad de bambú en simulación



(a)



(b)



(c)

Figura 65. Factor de seguridad de Hormigón en simulación

Resultados de esfuerzo deformación

A continuación, se muestra el esfuerzo deformación de los dos materiales evaluados con el método propuesto por el software, el esfuerzo de Von Mises conocida comúnmente como teoría de fallo siendo proporcional a la energía de distorsión, el desplazamiento de los elementos, no serán identificados como críticos ya que el estudio es realizado de una manera estática; con este método se identificara los criterios de falla a los elementos sometidos a distintas cargas de manera estática de una columna estructural de hormigón y otra de bambú.

De la simulación se puede determinar el comportamiento de los materiales en similares condiciones de evaluación, se observa que la resistencia a la tracción y el límite elástico del bambú es mayor que el hormigón.

La tabla 56 muestra los resultados obtenidos con el criterio de Von Mises.

Tabla 56. Resultados de simulación Von Mises

Material	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón
Esfuerzo (Ton)	0.38	0.38	3.40	3.40	4.15	4.15
Máximo (Mpa)	1.141	0.453	9.981	2.306	12.18	2.545
Punto Rotura (Mpa)	0.202	0.0745	1.766	0.537	2.15	0.592

En las figuras 66 (a), (b) y (c) muestran el aumento de carga en simulación de 0.38, 3.40 y 4.15 toneladas, la resistencia a la deformación del bambú es de 0.202, 1.766 y 2.15 Mpa en su punto de fractura. A diferencia del hormigón en las figuras 67 (a), (b) y (c), muestra valores de resistencia a la deformación de 0.0745, 0.537 y 0.592 Mpa; resultados más evidentes en la base de cada elemento debido a que es la sección de mayor carga. Comparando los resultados el bambú muestra mejores resultados que el hormigón cada uno con su curva de iteraciones hasta alcanzar una variación menor al 1%, siendo este un valor cercano a la convergencia en decimales.

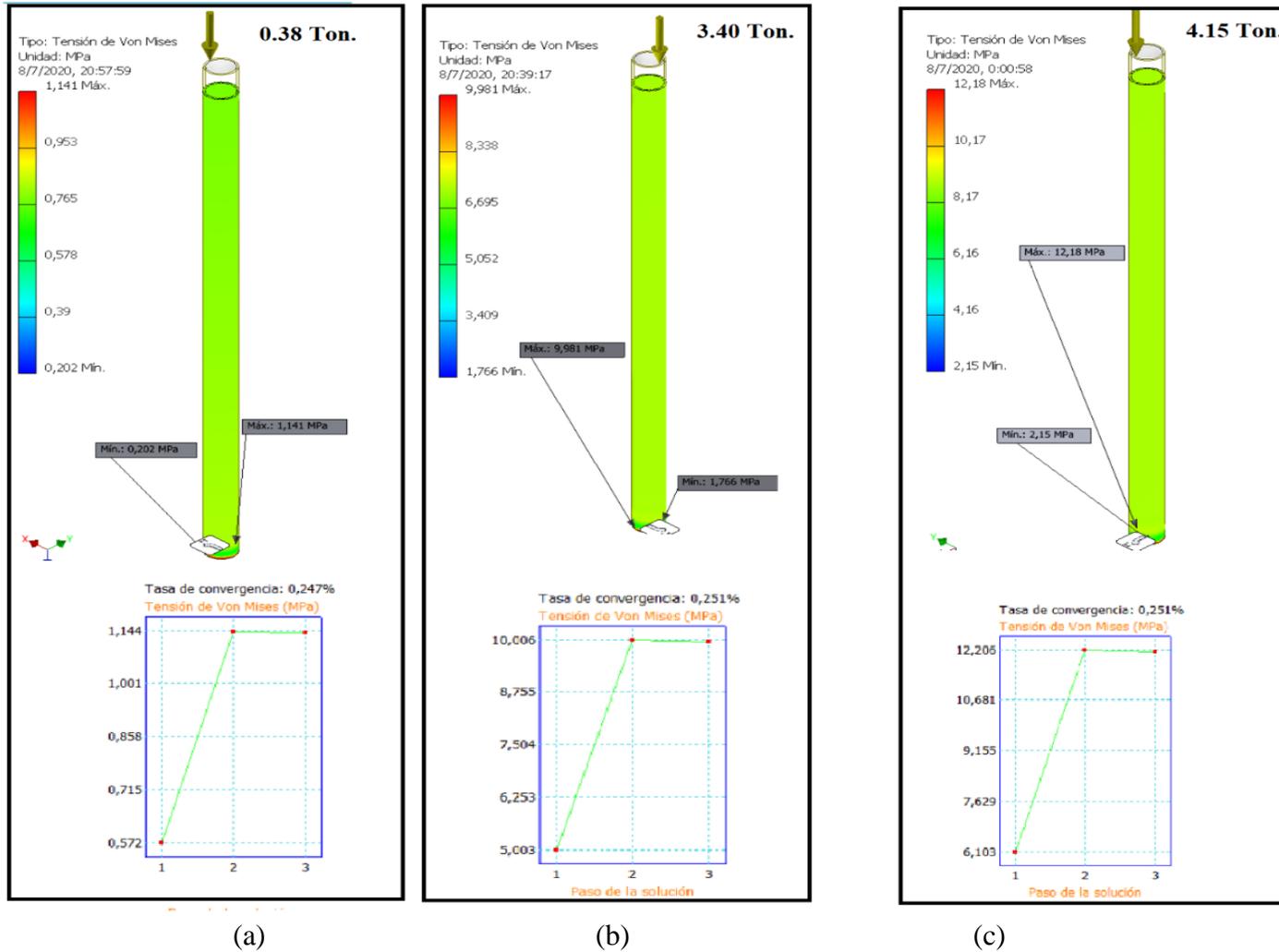


Figura 66. Esfuerzo deformación del bambú en simulación

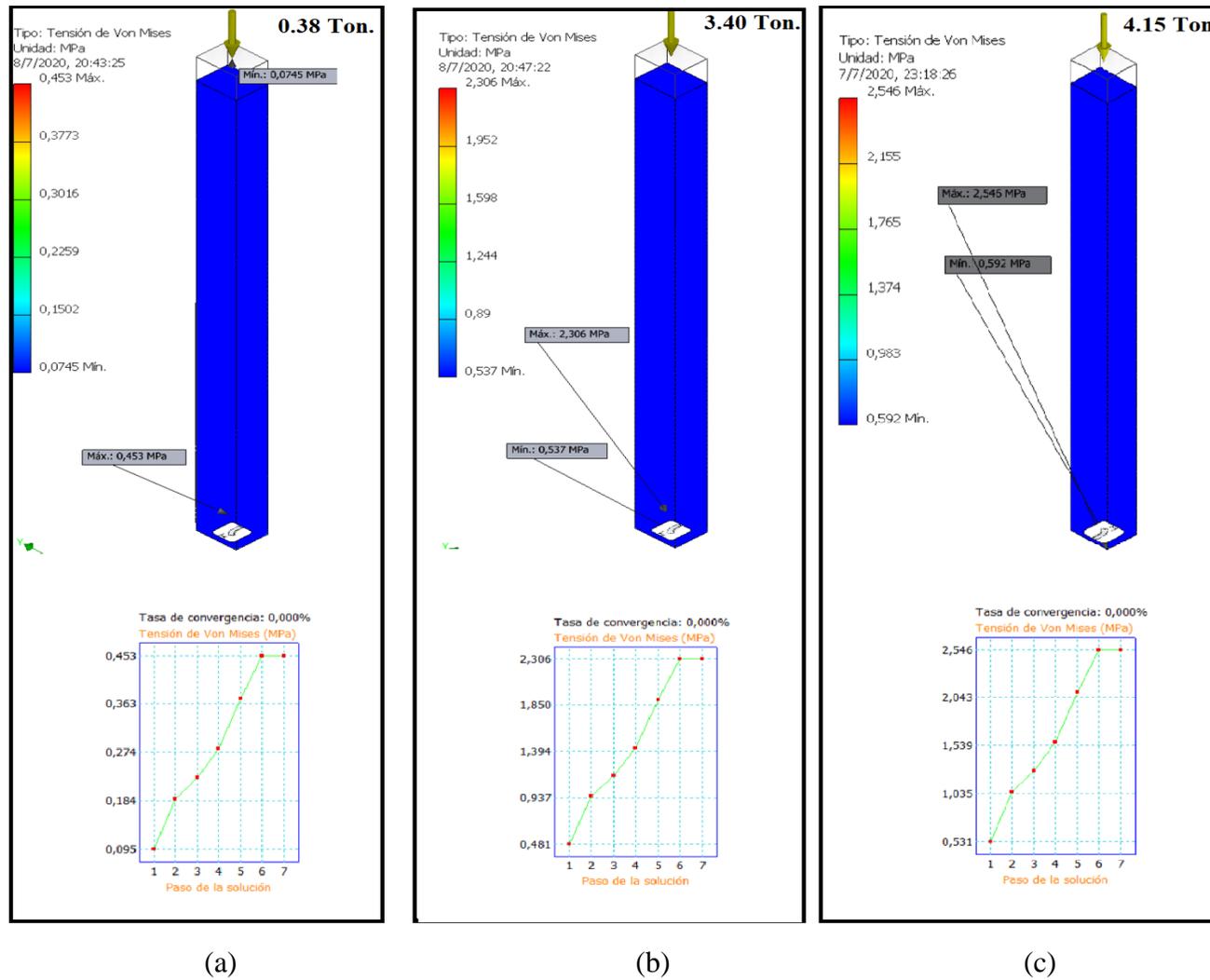


Figura 67. Esfuerzo deformación del hormigón en simulación

Resultado de desplazamiento

Otra variable que se evaluó en simulación es el desplazamiento generado por las cargas aplicadas, mostrando zonas críticas de cada elemento, definiéndolas como falta de rendimiento del material en el bambú obteniendo mayor desplazamiento.

Se analiza los desplazamientos generados en la parte superior de la columna con respecto a la fuerza o carga aplicada, es la parte donde se verá afectado en cuanto a desplazamiento por fuerza de compresión, se observa que en la carga más crítica aplicada a cada elemento de 4.15 toneladas, el bambú genera un desplazamiento de 1.481 mm y en hormigón 0.1095 mm, lo que vendría a ser valores de relevancia en su comparación siendo valores muy bajos de desplazamiento mostrado en la tabla 57.

Tabla 57. Resultado de desplazamiento en simulación

Material	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón
Esfuerzo (Ton)	0.38	0.38	3.40	3.40	4.15	4.15
Desplaz. Máximo (mm)	0.1372	0.0141	0.1213	0.0957	1.481	0.1095
Desplaz. Mínimo (mm)	0	0	0	0	0	0

Esto podría indicar que el bambú es un material más propenso a sufrir daños por deformación en comparación con el hormigón debido a su desplazamiento como muestra la tabla 57, sin embargo, al ser valores de desplazamientos mínimos no se vería afectado en la seguridad y viabilidad en uso estructural debido a que los factores de seguridad obtenidos como muestra la tabla 55 comparando el bambú y al hormigón, el bambú obtiene factores de seguridad mayores al hormigón. El desplazamiento en simulación por efecto de cargas se muestra en la figura 68 (a), (b) y (c) para el bambú, la figura 69 (a), (b) y (c) muestra valores de desplazamiento para el hormigón.

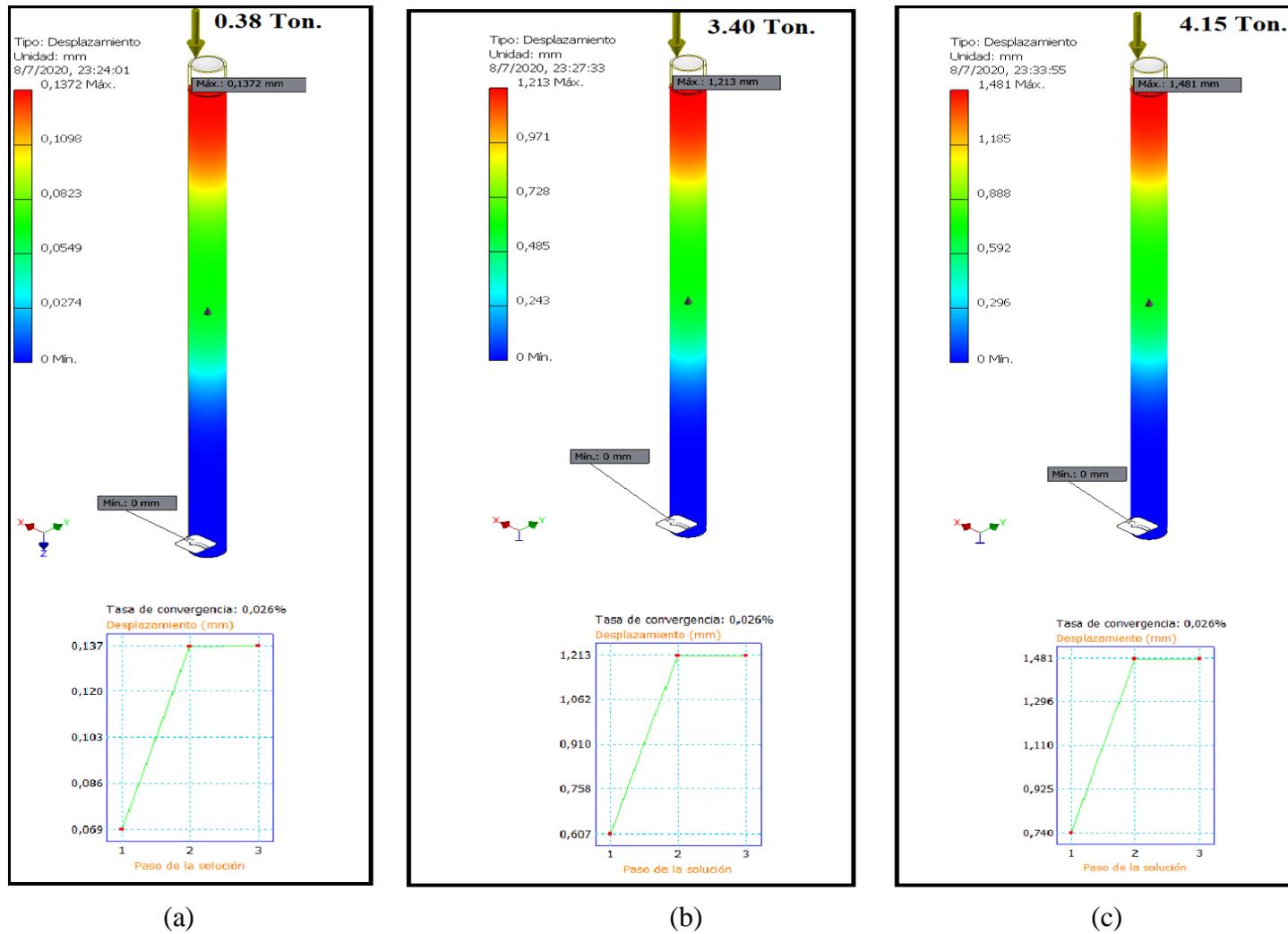
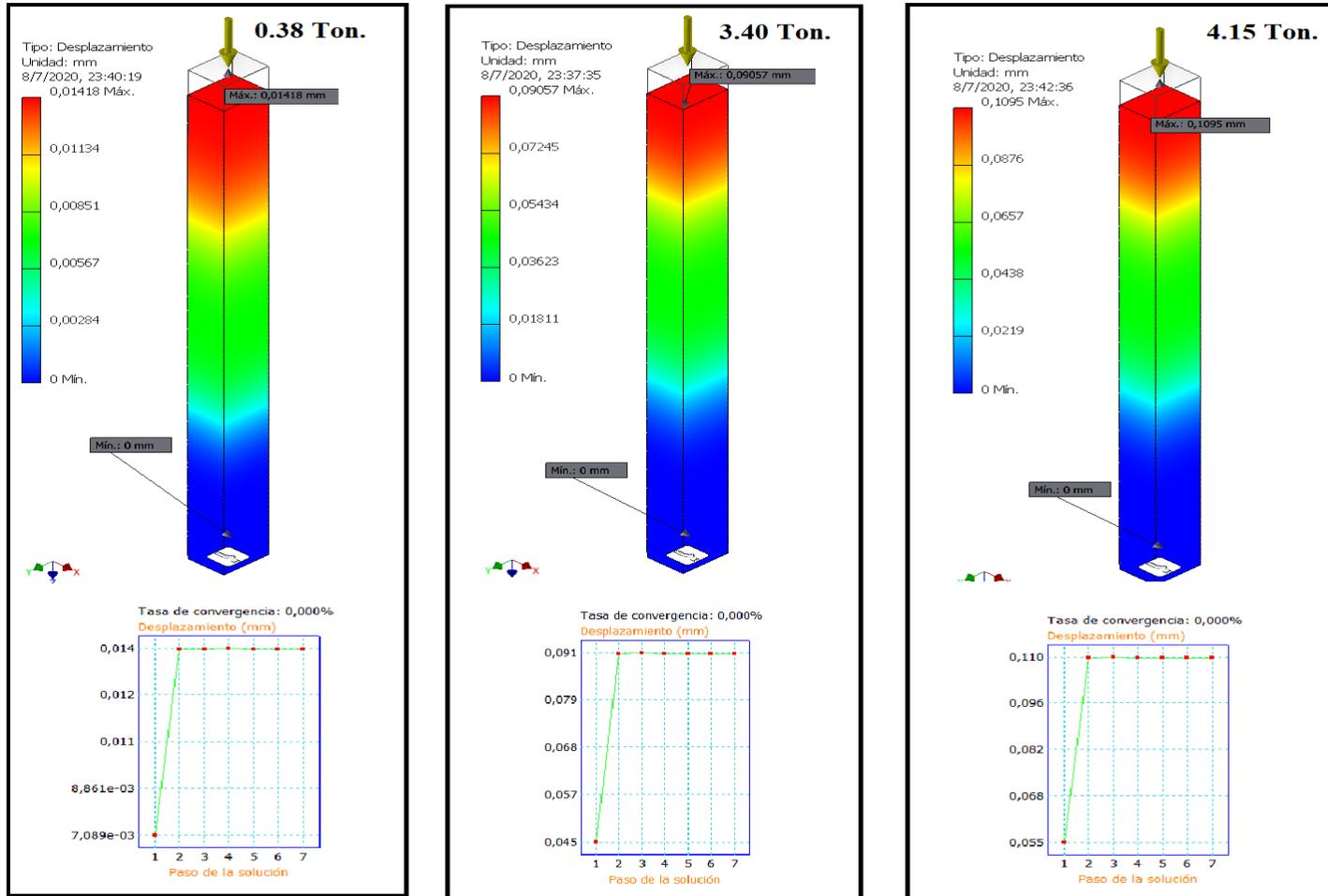


Figura 68. Desplazamiento del bambú en simulación



(a)

(b)

(c)

Figura 69. Desplazamiento del hormigón en simulación

Comparación de resultados de simulación

En las figuras 64, 65, 66, 67, 68 y 69 detalla los valores obtenidos mediante varias simulaciones para poder determinar distintos FS, punto de falla y desplazamientos de cada elemento y saber el comportamiento de cada uno aplicando distintas cargas para su validación y comparación.

Se debe tener en cuenta que cada material tiene tanto propiedades físicas y mecánicas distintas, en algunas ocasiones favorece el límite de elasticidad y esfuerzo máximo a tracción, para esta aplicación, favorece en cuanto a la aplicación de cargas a las que fueron sometidos los dos elementos. La figura 70, muestra el análisis comparativo de factor de seguridad entre el bambú y el hormigón en sus diferentes cargas de aplicación a cada elemento.

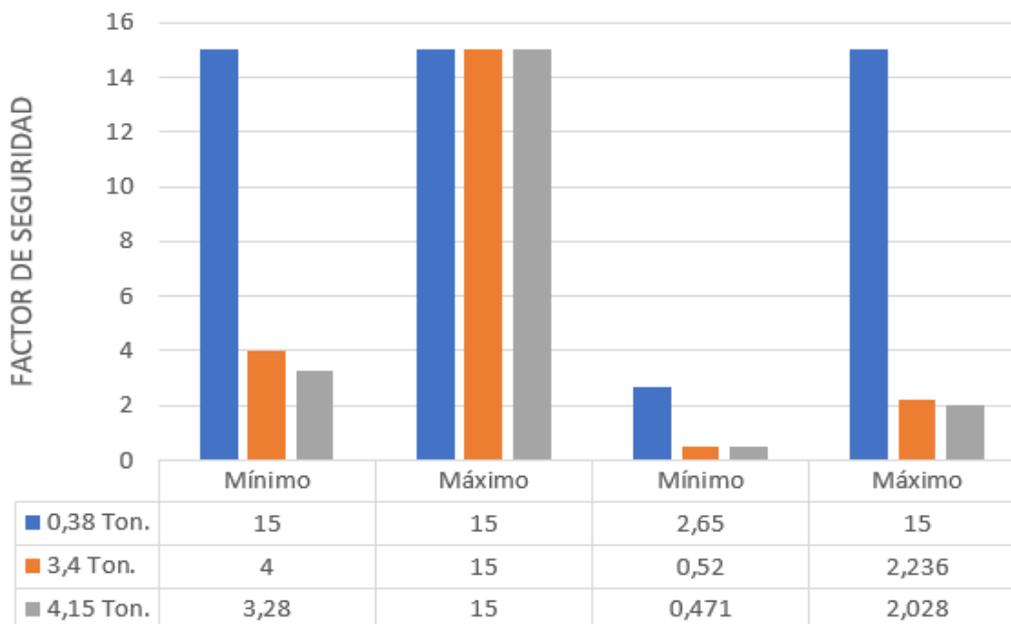


Figura 70. Comparación F.S. Bambú y Hormigón

La figura 71, detalla el análisis comparativo de desplazamiento entre el bambú y el hormigón en sus diferentes cargas aplicadas. Hay que tener en cuenta que el bambú presenta un mayor desplazamiento ocasionado por las distintas fuerzas de compresión que se le aplico, sin embargo, no son valores significativos que no puedan garantizar la fiabilidad del material en la aplicación de columna estructural.

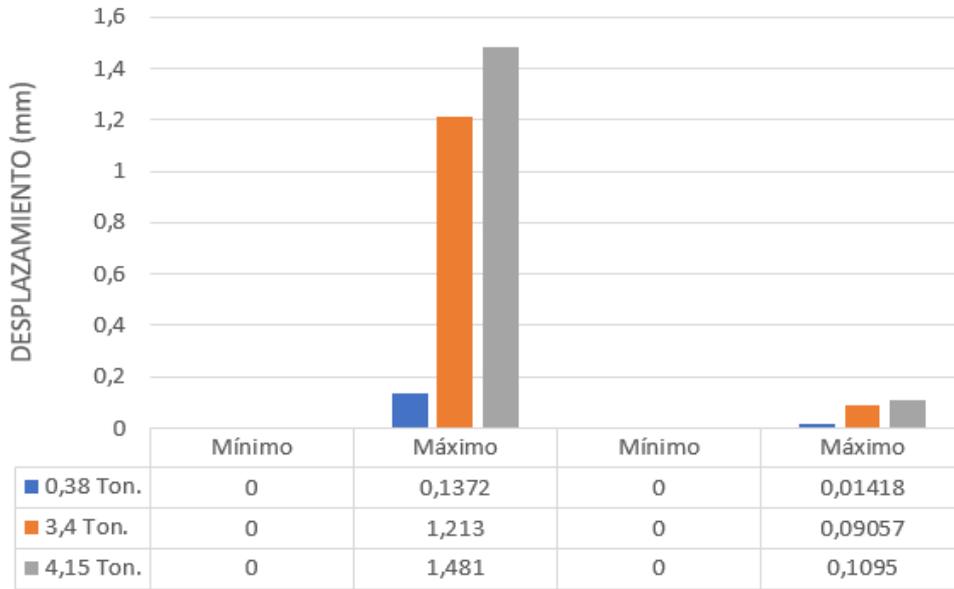


Figura 71. Comparación Desplazamiento entre Bambú y Hormigón

La figura 72, muestra el análisis comparativo mediante el criterio de falla de Von Misses entre el bambú y el hormigón en sus diferentes cargas aplicadas; validando mediante simulación que el bambú puede ser un material óptimo para reemplazo al hormigón.

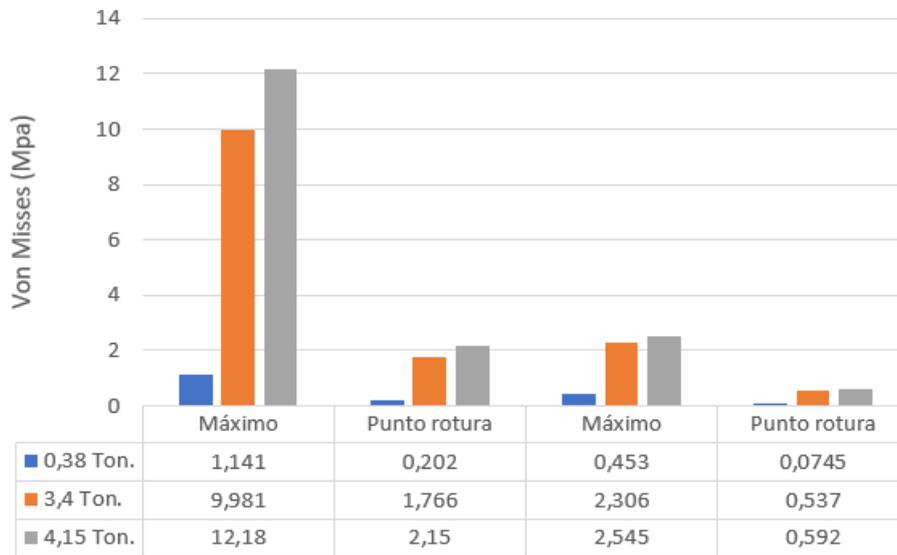


Figura 72. Comparación Von Misses entre bambú y hormigón

La figura 73, muestra los resultados de simulación CAD 3D en Factor de Seguridad a 0.38, 3.40 y 4.15 toneladas aplicadas al material actual de Hormigón y material ganador obtenido mediante los métodos multicriterio el Bambú.

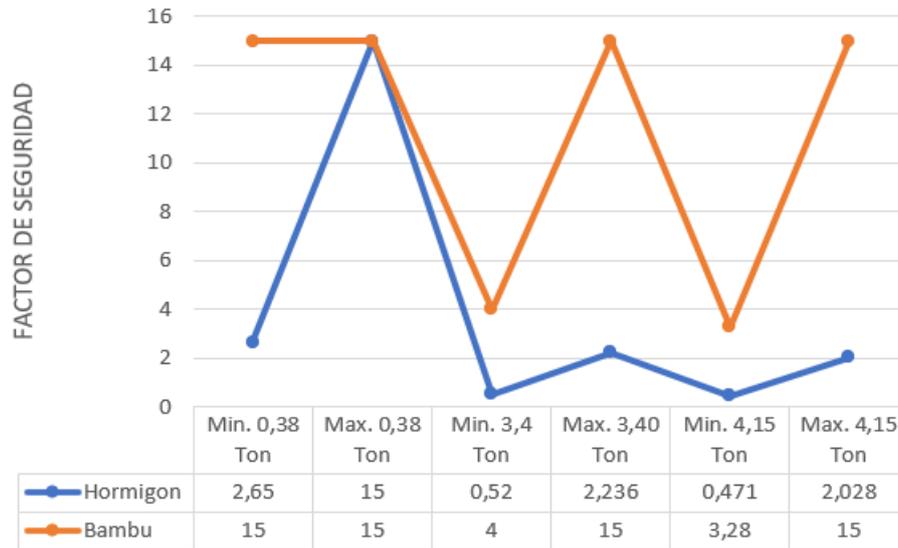


Figura 73 Comparación de resultados F.S. Hormigón-Bambú

La figura 74, muestra valores obtenidos acorde a los desplazamientos de cada elemento estructural al someterlos a distintas cargas a compresión en simulación, en este caso se muestra la resistencia a compresión de los materiales ensayados, siendo mejor el que presente menor desplazamiento frente a las cargas aplicadas, en este caso el que menor desplazamiento obtuvo es el hormigón, sin embargo, los desplazamientos obtenidos por el bambú a someterlo a las mismas cargas, no presento una variación significativa y se puede validar este material por los distintos factores de seguridad obtenidos; los desplazamientos iguales a 0, son los desplazamientos en la base de cada elemento, los únicos desplazamientos existentes, es en el otro extremo del elemento donde es aplicada la carga.

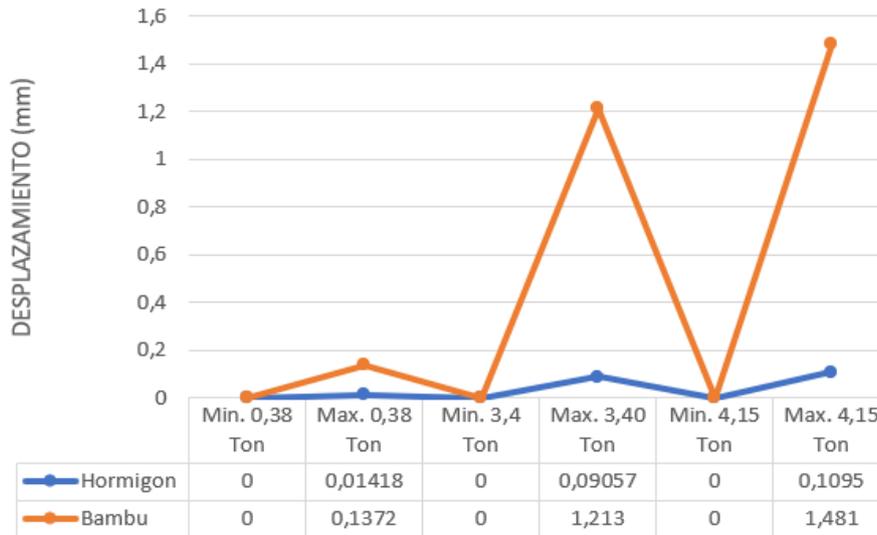


Figura 74. Comparación de resultados Desplazamiento Hormigón-Bambú

Por último, la figura 75 representa la energía de distorsión o teoría de fallo Von Misses; muestra esfuerzos permisibles dentro de la resistencia ultima a la tracción y limite elástico de cada material estudiado previo a su fractura, la información obtenida puede ser analizada en conjunto con los distintos factores de seguridad obtenidos de cada elemento analizado a distintas cargas de compresión que fueron sometidos, mostrando una mayor resistencia el Bambú que el Hormigón de uso actual.

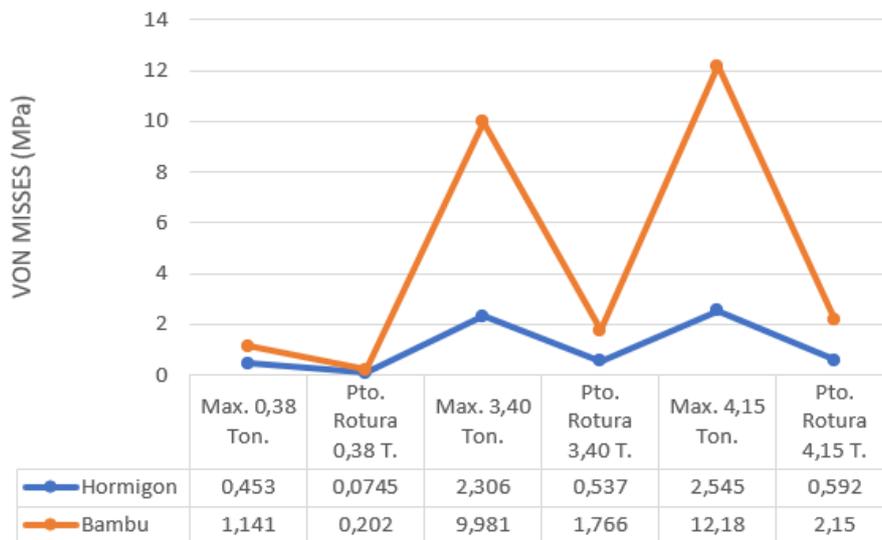


Figura 75. Comparación de resultados Von Misses Bambú-Hormigón

Se puede determinar que los resultados obtenidos mediante simulación mecánica computarizada, facilita el proceso de diseño y calculo para garantizar la fiabilidad de un

producto o material antes de ponerlo en el mercado o en su utilización, de igual manera este tipo de simulaciones son de gran ayuda para minimizar costos en cuanto a la realización de maquetas, prototipos y selección de materiales.

Comparación de resultados de la investigación

En primera instancia se planteó la selección de un material alternativo para la aplicación en una columna estructural de hormigón tomando en cuenta principalmente que el estudio debe ser en términos de sostenibilidad. Los objetivos planteados fueron especialmente en el bajo costo del material y huella de CO₂ que implica su producción primaria. Estos se aplicaron mediante índices de rendimiento en el software CES Edupack. Se estableció también que los materiales deben ser biodegradables y/o reciclables, con lo que se pudo determinar que dentro de 10 materiales idóneos destacó principalmente el Bambú como material preponderante en su aplicación. La tabla 49 muestra la comparativa del Bambú vs Hormigón donde se destaca que el material obtenido consigue los valores más bajos en cuanto a costos y propiedades ecológicas lo que demuestra que este material satisface los criterios de diseño sostenible para su aplicación como muestra la tabla 58.

Tabla 58. Comparativa de costos, reciclabilidad y biodegradabilidad del Bambú vs Hormigón

Variables		Materiales	
Propiedades	Características	Bambú	Hormigón
Costo	USD	1.67	438.67
Ecológicas	Reciclabilidad	Si	SI
	Biodegradabilidad	Si	No
	Huella de CO ₂ , producción primaria (Kg)	0.004	0.24

De igual manera se planificó una metodología de investigación para una correcta selección de materiales para poder valorar las características, ventajas y desventajas de cada uno. Se realizó un análisis mediante métodos multicriterio para poder buscar una solución óptima al reemplazo del material. Posterior al ingreso de datos fueron

evaluados mediante ponderación de pesos siendo el método de Variación Estadística el óptimo. La obtención de resultados obtenidos destaca las principales características que debe tener el material como reemplazo a una columna de hormigón. La tabla 59 muestra una comparativa de las propiedades físicas y mecánicas del bambú vs hormigón obteniendo mejores resultados el bambú en cuanto a densidad y resistencia a la compresión que son los principales criterios para la selección del material idóneo en su aplicación.

Tabla 59. Propiedades físicas y mecánicas del bambú vs hormigón

Variables		Materiales	
Propiedades	Características	Bambú	Hormigón
Físicas	Densidad Kg/m^3	700	$2,4e^3$
	Módulo de Young (Gpa)	17,5	20
	Resistencia a la tracción (Mpa)	239,5	1,2
Mecánicas	Resistencia a la compresión (Mpa)	80	30
	Coefficiente de poisson	0,46	0,3
	Límite de fluencia (Mpa)	40	1,2
	Módulo cortante (Gpa)	1,08	17,4

La tabla 60 muestra los valores obtenidos de los distintos factores de seguridad máximos y mínimos mediante la aplicación de distintas cargas aplicados a los dos materiales en simulación. Se determina que mediante la aplicación de las cargas correspondientes de 3.40 toneladas y 4.15 toneladas, la columna de hormigón tiende a fallar especialmente en el base obteniendo valores inferiores a uno. El bambú por otro lado obtiene valores superiores a uno lo que significa que este material no fallara mediante la aplicación de dichas cargas. El fallo presente en columnas principalmente será en la base de cada elemento debido a que es la sección de mayor carga. Esto se debe principalmente que, al ser un elemento que trabaja principalmente bajo esfuerzos de compresión, es el encargado de transmitir cargas a través de toda su geometría a la cimentación de la vivienda.

Tabla 60. Comparación de FS bambú vs hormigón

Material	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón
Esfuerzo (Ton)	0.38	0.38	3.40	3.40	4.15	4.15
Máximo	15	15	15	2.236	15	2.028
Mínimo	15	2.65	4	0.52	3.28	0.471

La tabla 61 muestra los valores obtenidos mediante la teoría de falla de Von Misses donde se identifica los criterios de falla de los elementos (bambú y hormigón) sometidos a distintas cargas de 0.38, 3.40 y 4.15 toneladas. La resistencia a la deformación del bambú es de 0.202, 1.766 y 2.15 Mpa en su punto de fractura. A diferencia del hormigón donde los valores de resistencia a la deformación de 0.0745, 0.537 y 0.592 Mpa. Los resultados más evidentes lo obtienen el bambú al obtener una mayor resistencia a la deformación mediante la aplicación de cargas.

Tabla 61. Resistencia a la deformación del bambú vs hormigón

Material	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón
Esfuerzo (Ton)	0.38	0.38	3.40	3.40	4.15	4.15
Punto Rotura (Mpa)	0.202	0.0745	1.766	0.537	2.15	0.592

La tabla 62 muestra los resultados del desplazamiento de cada material mediante la aplicación de distintas cargas de compresión. Se determina que el bambú en este análisis carece de falta de rendimiento al obtener mayores desplazamientos en la carga crítica de 4.15 toneladas donde genera un desplazamiento de 1.481 mm y en hormigón de 0.1095 mm. Sin embargo, son valores de desplazamiento que no generan mayor preocupación en su aplicación donde valores superiores a 1 cm sería valores significativos.

Tabla 62. Desplazamiento del bambú vs hormigón

Material	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón	Bambú	Hormigón
Esfuerzo (Ton)	0.38	0.38	3.40	3.40	4.15	4.15
Desplaz. Máximo (mm)	0.1372	0.0141	0.1213	0.0957	1.481	0.1095

Discusión de resultados

El objetivo de plantear un diseño ecológico en infraestructura se define principalmente por tres principales índices: económicos, sociales y ambientales. El estudio de Castillo Moncayo, D. C. (2018) en su publicación “Análisis de la implementación de ladrillos fabricados a partir de plástico reciclado como material de construcción”. Propone la utilización de columnas Brickarp cuyo componente principal es el plástico proveniente de botellas de plástico PET extruido para conformar una columna que satisface con los tres principales índices mencionados. La tabla 63 muestra las características técnicas de la columna.

Tabla 63. Características técnicas columnas Brickarp

Características	Valor
Resistencia a la tracción Mpa	185.54
Resistencia a la compresión Mpa	199.95
Modulo elástico Gpa	0.127
Densidad Kg/m ³	0.98
Reciclaje	Si
Biodegradabilidad	No

Fuente: (Castillo Moncayo, D. C. 2018)

La tabla 64 muestra las características técnicas del bambú obtenidas mediante la aplicación de índices de rendimiento en el Software CES Edupack que de igual manera satisface con los 3 principales objetivos planteados.

Tabla 64. Características técnicas bambú

Características	Valor
Resistencia a la tracción Mpa	239.5
Resistencia a la compresión Mpa	80
Modulo elástico Gpa	17.5
Densidad Kg/m ³	700

Reciclaje	Si
Biodegradabilidad	Si

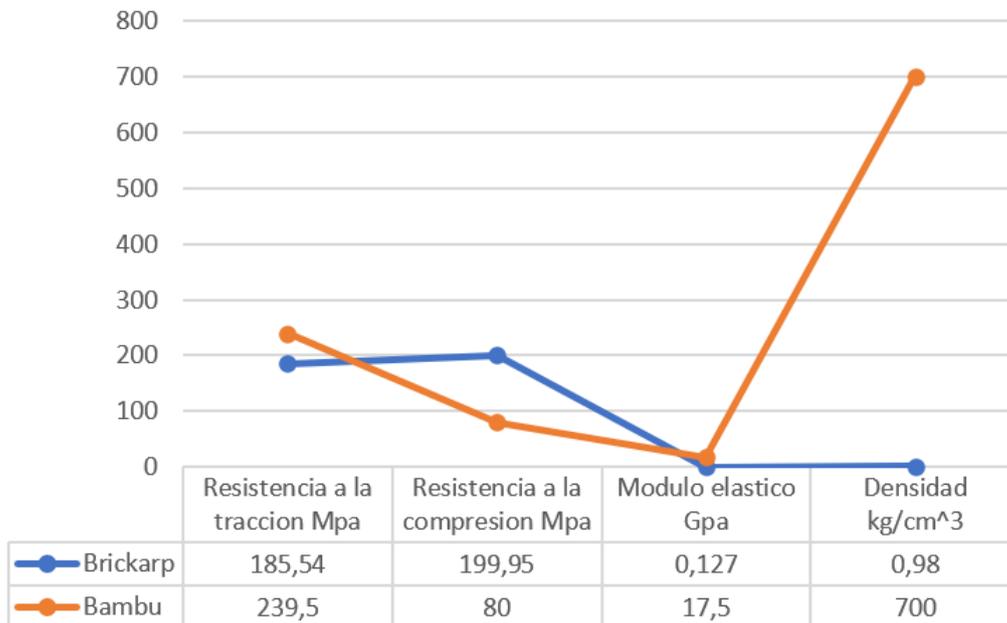


Figura 76. Grafica comparativa de propiedades del bambú vs Columna Brickarp

En la figura 76, se puede apreciar la diferencia entre los dos materiales, obteniendo una mejor resistencia a la compresión las columnas Brickarp en comparación del Bambú. Ambos materiales utilizados en construcción son una propuesta válida para su utilización, sin embargo, en cuanto a costos los fabricantes de columnas Brickarp no proporcionan información sobre los precios de fabricación y comercialización de su producto siendo el bambú como propuesta más económica por falta de resultados para su comparación. En cuanto a aspectos sociales, ambas propuestas satisfacen su utilización en la construcción de viviendas de interés social brindando seguridad a sus ocupantes y facilidad de instalación. En aspectos ambientales la propuesta de utilización de plástico reciclado es una buena alternativa para limpiar grandes toneladas de plástico con un proceso de reciclado en la fabricación de bloques y columnas Brickarp. El bambú por otro lado satisface la alternativa de la utilización del Hormigón y la explotación acelerada del mismo. Ambas propuestas satisfacen los tres

objetivos principales planteados siendo una propuesta alternativa a esta investigación como la utilización de columnas Brickarp.

El estudio de (Agarwal et al., 2014) en su publicación: “Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns”. Propone la utilización del bambú tratado químicamente como refuerzo a columnas y vigas de hormigón donde los principales resultados en pruebas de compresión se muestran en la tabla 65. La prueba de compresión axial la realizaron en columnas cortas de dimensión 150 mm 150 mm 1000 mm fundidas utilizando una mezcla de diseño de hormigón M20. Se fundieron un total de 24 columnas que incluyen 3 números de columnas de concreto liso, 3 números de columnas de concreto reforzado con acero (con refuerzo de 0.89%) y tres columnas de concreto reforzado de bambú no tratadas y tratadas con refuerzo de 3%, 5% y 8 % respectivamente. Tomando a consideración las pruebas realizadas de probetas de bambú tratado (tabla 65) para compararlos en simulación al bambú con la aplicación de cargas ultimas para comparar su deformación.

Tabla 65. Resultados de prueba de compresión axial bambú tratado como refuerzo al concreto

Probeta	% de refuerzo de bambú.	Carga axial última (KN)	Deformación axial (mm)
1	3.00	315	4.82
2	5.00	396	5.52
3	8.00	432	5.80

Fuente: (Agarwal et al., 2014)

La tabla 66 muestra los valores obtenidos en simulación mediante la aplicación de carga axial ultima (tabla 65) a la columna de bambú propuesta en la investigación.

Tabla 66. Resultados de compresión axial a columna de bambú en simulación.

Prueba	Carga axial última (KN)	Deformación axial (mm)
1	315	11.45
2	396	14.39
3	432	15.7

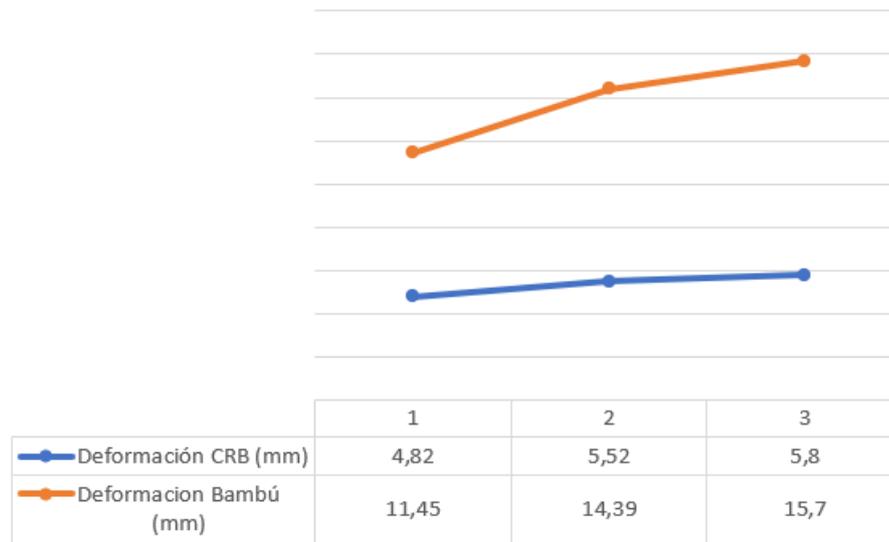


Figura 77. Gráfica comparativa de deformación del bambú sometida a cargas de compresión axial

Como se puede apreciar en la figura 77 el Concreto Reforzado con Bambú (CRB) tiene una deformación menor significativa en comparación al bambú. Esto se debe principalmente que al tener un material compuesto sólido de bambú - concreto aumenta significativamente su resistencia a la compresión. Sin embargo, en términos económicos no satisface con los tres objetivos planteados inicialmente, ya que para su fabricación en obra se necesita de mano de obra especializada y el control de agregado aumentando su costo de fabricación en obra. En términos ambientales la utilización del gel Sikadur 32 para la unión de su interfaz, el producto es contaminante de agua, no permite el paso de alcantarillado, cursos de agua o terrenos y de acuerdo con las informaciones sobre sustancias perjudiciales para el medio ambiente, no puede excluirse el riesgo correspondiente del producto. Dicho esto, no satisface con los requerimientos ambientales (Sikadur-32, 2018). En términos sociales la utilización del material compuesto (bambú - hormigón) en construcción puede garantizar su utilización por sus propiedades mecánicas esto dependerá del diseño y requerimientos estructurales del proyecto. En conclusión, si bien es un material compuesto que tiene mejores propiedades y ventajas al bambú, el no satisfacer con los tres objetivos principales este material quedaría descartado en la utilización de materiales en términos ecológicos

como lo plantea la presente investigación. Por otro lado, para poder contrarrestar las deformaciones del material (bambú) con la aplicación de dichas cargas axiales se puede plantear la utilización de otra columna de bambú para aminorar su deformación como lo denota la normativa NEC-SE-GUADÚA: Estructuras de Guadúa.

El estudio de (Ashby, 2010) en su libro “Materials Selection in Mechanical Design”. En el capítulo 6 “Case Studies: Material Selection”, sección 6.5 “Cost: Structural Materials For Building” plantea la selección de materiales para vigas de piso utilizando índices de rendimiento enfocados principalmente a la resistencia a la flexión o módulo de ruptura y módulo de Young donde su objetivo principal es el de minimizar costos (resistencia y rigidez a un costo mínimo) obteniendo materiales como se muestra en la tabla 67. Donde M1 es el índice de rendimiento a resistencia a la flexión a un bajo costo. M2 índice de rendimiento módulo de Young a un bajo costo.

Tabla 67. Materiales estructurales para edificios (ASHBY)

Material	M1 ($\text{GPa}^{\frac{1}{2}}/(\text{Kg}/\text{m}^3)$)	M2 ($\text{MPa}^{\frac{2}{3}}/(\text{Kg}/\text{m}^3)$)	Comentarios
Concreto	160	14	Usados solamente en elementos a compresión
Ladrillo	12	12	
Piedra	9.3	12	
Maderas	21	90	Puede soportar la flexión y la tensión, así como la compresión, lo que permite una mayor libertad de forma
Hierro fundido	17	90	
Acero	14	45	

Fuente: (Ashby, 2010)

Sin embargo, para esta selección planteada por Ashby, no se puede determinar cuál de los materiales que propone será el más adecuado en su aplicación en cuanto a la utilización de los índices de rendimiento que se planteó. Por lo que se sugiere un análisis por medio de métodos multicriterio para poder determinar el material óptimo

para la aplicación en columnas. De igual manera se sugiere la implementación de criterios de diseño sostenible como lo plantea la presente investigación.

Mediante la aplicación de índices de rendimiento planteados en la presente investigación, el objetivo de igual manera es un diseño de esfuerzo y rigidez a un costo y huella de CO₂ limitada con el objetivo de plantear la utilización de materiales con un diseño sostenible y ecológico que no lo plantea Ashby en la selección anterior. Si bien el costo es un objetivo primordial enfocados al ámbito de construcción de viviendas de interés social se debe aumentar más criterios para que satisfaga con los tres objetivos planteados inicialmente (Económicos, Sociales y Ambientales). La tabla 68 muestra los materiales obtenidos mediante la aplicación de índices de rendimiento. FOM₁ Huella de CO₂ por unidad de resistencia a la compresión. FOM₂ costo por unidad de resistencia a la compresión.

Tabla 68. Materiales para la construcción sostenibles (AUTOR)

Material	FOM ₁	FOM ₂	Reciclable/Biodegradable	Comentarios
Concreto	30	30	Si/No	
Compuestos	29.95	29.95	No/Si	Se tiene una mayor gama de productos especialmente en términos de sostenibilidad, los materiales compuestos, plywood, corcho y paja son materiales renovables
Bambú	80	80	Si/SI	
Plywood	30.5	30.5	No/Si	
Corcho	2.99	2.99	No/Si	
Paja	0.64	0.64	No/Si	

Mediante la aplicación de criterios de decisión múltiple en cuanto a la selección optima del material entre los obtenidos destaca la utilización del bambú como muestra la figura 78 donde el ranking obtenido como primer lugar es el bambú, segundo lugar Plywood y tercer lugar tablero de fibra de madera (material compuesto) de esta manera se puede obtener mejores resultados en comparación a la selección de ASHBY tomando

a elección los materiales que más destacan en cuanto a la utilización de índices de rendimiento.

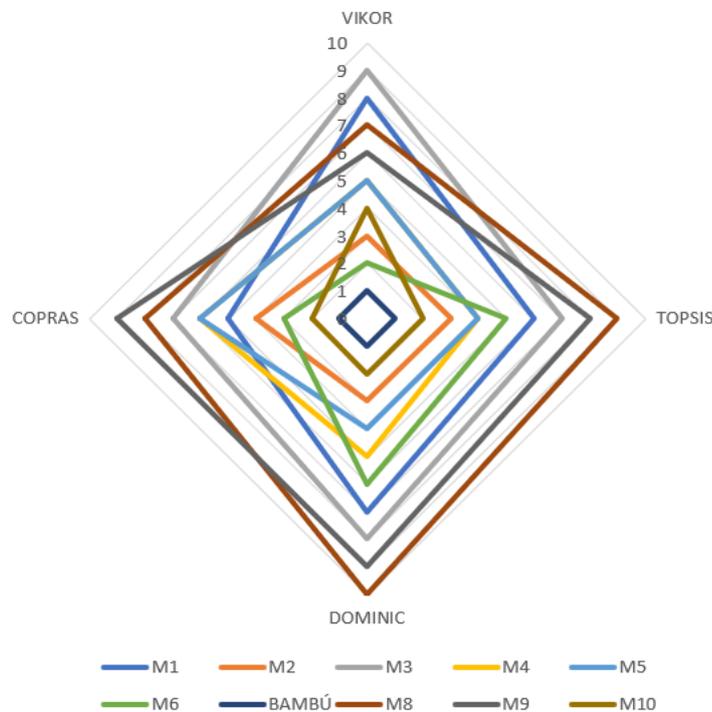


Figura 78. selección de material optimo mediante MCDM

Discusión de la propuesta del bambú en la construcción

El estudio y la propuesta de la utilización de este material como reemplazo al hormigón, destaca que la utilización del bambú proporciona múltiples beneficios constructivos ya que es un material térmico y aislante acústico debido que en su interior se forman cámaras de aire, permiten regular la temperatura del material y por ende de la vivienda. Otro beneficio es la instalación de tuberías para instalación hidráulica o desagües fluviales, es un material económico y de rápido crecimiento y se ha comprobado que puede reducir el costo de una vivienda hasta en un 50 o 60%, su utilización como muros. El bambú demuestra tener efectividad contra sismos al funcionar en bloques y en caso de un colapso el material es bastante liviano y su reconstrucción se puede llevar de manera fácil. Su periodo de vida útil es alrededor de 15 a 30 años, esto dependerá del mantenimiento que se lo de especialmente el

tratamiento contra insectos. Es un material que claramente puede ser utilizado como elemento estructural, esto es validado mediante la simulación de esfuerzos-deformación y los factores de seguridad obtenidos mediante la aplicación de distintas cargas y lo más importante del estudio es que es un material biodegradable que aporta con la disminución de la huella de CO₂ en el planeta. Esto demuestra que se logró cumplir con los principales objetivos planteados para la selección de un material alternativo a una columna estructural de hormigón.

Conclusiones

Se determinó que el uso de métodos multicriterio aplicados en el estudio (VIKOR, TOPSIS, DOMINIC y COPRAS) son un tipo de herramienta estadística, cuya contribución otorgan al decisor una manera orientada en cuanto a la toma de decisiones complejas, teniendo en cuenta varios criterios y alternativas acorde a lo que el decisor necesite en el ámbito de su investigación. Demostraron que los cuatro métodos utilizados identifican al Bambú como material válido para el reemplazo de una columna estructural de hormigón.

Se corrobora que el método de variación estadística es el más apropiado para aplicarlo en el estudio, debido a los resultados obtenidos en cuanto a pesos de cada criterio acorde a lo estipulado con el decisor. Siendo los valores obtenidos en cuanto a la resistencia a la compresión con un valor de 0.088 y para el módulo cortante de 0.224. En comparación a los demás métodos de ponderación de pesos este método obtiene los valores más altos influyendo de manera positiva en los métodos multicriterio.

Se estableció que el uso de material alternativo para el uso de columnas de hormigón, en este caso el bambú, en comparación al hormigón, es un material biodegradable y reciclable. Se obtiene una baja huella de CO₂ en su producción primaria obteniendo valores de 0.004 Kg/Kg para el bambú y 0.24 Kg/Kg para el hormigón. Esto se debe principalmente a que el bambú es un material natural; la vida útil del Bambú dependerá del mantenimiento que se le de, de igual manera se obtiene resultados similares al hormigón que pueden validar su uso y seguridad de los ocupantes.

Se establece la viabilidad del uso del bambú en cuanto a la propuesta de vivienda mediante cargas aplicadas de 0.38, 3.40 y 4.14 toneladas. En simulación los factores de seguridad garantizan su aplicación obteniendo resultados para el bambú de

15, 4 y 3.28 respectivamente (Valores adimensionales). Los valores obtenidos del hormigón sometido a las mismas cargas se obtienen valores de 2.65, 0.52 y 0.471 donde sus últimos valores comprueban que el material tendera a fallar por concentraciones de esfuerzo en los puntos sobresalientes (Aristas) del elemento causado por deficiencia del material.

Se determina que, en cuanto a costos, el uso del bambú es un material más económico que se lo puede aplicar a Viviendas de Interés Social, validando su uso especialmente en la comunidad de Limoncocha mediante la aplicación virtual en simulación de la propuesta de vivienda realizada en el presente proyecto.

Se confirmo que el uso de un método multicriterio para la selección de materiales no es óptimo ya que los resultados pueden variar.

Se pudo determinar mediante el uso de generador de precios de Cype Cad Ecuador, la construcción de una sola columna de hormigón armado tiene un valor de 438.70 dólares y en conjunto un valor total 4387 dólares acorde al número total de columnas necesarias planteadas en la propuesta de vivienda del proyecto. Comparado con el bambú, este puede llegar a tener un valor aproximado de 4 dólares el metro lineal en Ecuador, que acorde con el número total de columnas necesarias planteadas en la propuesta de vivienda tiene un valor total de 40 dólares.

Se identifico que el uso del software CES Edupack permite crear varios diseños de selección de materiales bajo índices de rendimiento, obteniendo diseños ecológicos que puedan ser beneficiosos para el medio ambiente y proyectos de sostenibilidad esto gracias a su amplia gama de materiales y niveles de búsqueda que lo incorpora.

En cuanto a la comparación de resultados obtenida mediante otros estudios, se pudo concluir que el uso del bambú es un material optimo que satisface los tres principales objetivos planteados (Económicos, Sociales y Ambientales). Esto garantiza

que el diseño y la implementación de un sistema sostenible en el ámbito de la construcción este material es el más adecuado para su implementación.

La construcción civil (edificios, puentes, carreteras y similares) es intensiva en materiales. El costo del material domina el precio del producto, y la cantidad utilizada es enorme. Entonces solo califica el material más barato, y el diseño debe adaptarse para su uso.

Recomendaciones

Revisando los materiales obtenidos como alternativas al uso de hormigón, se muestra que los 10 materiales candidatos tienen un alto potencial para poder ser incorporados a la industria de la construcción, si bien tienen limitantes en cuanto a sus aplicaciones, se puede plantear de igual manera su uso en Viviendas de interés Social para poder proveer una mejor calidad de vida, seguridad de uso y beneficios ecológicos para personas de bajos recursos económicos, dicho esto, se trata de crear motivación para futuras investigaciones.

Se puede plantear y acabar el estudio estructural en futuras averiguaciones en términos de sostenibilidad, con el fin de poder incorporar el diseño de vivienda planteada en el presente proyecto para poder implementar su construcción en la comunidad de Limoncocha.

Referencias Bibliográficas

- Andrade Pesantez, A. E. (2019). Selección de material con método MCDM, para manija de apertura interior de puerta de vehículo y comprobación de resultados con simulación computacional y experimental.
- Ashby, M. F. (2012). *Materials and the environment: eco-informed material choice*. Elsevier.
- Ashby, MF (2011). *Selección de materiales en diseño mecánico* (Burlington, MA.
- BLANCO, Ána, “Durabilidad del hormigón con fibras de acero”. Tesis de grado de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona (2008).
- Callister Jr., WD y Rethwisch, DG (2020). *Callister's Materials Science and Engineering*. John Wiley & Sons.
- Cansario Pérez, M. D. M. (2005). *Sistema constructivo de paneles aligerados con poliestireno expandido y malla electrosoldada espacial: Estudio estructural y optimización*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Castillo Moncayo, D. C. *Análisis de la implementación de ladrillos fabricados a partir de plástico reciclado como material de construcción*.
- Chen, S. Hwang, C. Beckmann, M. and Krelle, W. *Fuzzy multiple attribute decision making methods and applications*, (Springer Verlag, New York, 1992).
- Edgar Salazar Marín, Juan Felipe Arroyave L. y Wilson Pérez Castro (2011). *Scientia et Technica de la Universidad Tecnológica de Pereira. Energías alternativas, experiencias desde el semillero de investigación en tecnología mecánica. Vol.3 (49) [En Línea] Consultado: [30, octubre, 2017]. Disponible en: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/1537/1045>*
- Gómez Moreira, C. R. (2015). *ANALISIS COMPARATIVO ENTRE METODOLOGIA SIP Y METODOLOGIA TRADICIONAL EN LA CONSTRUCCION DE VIVIENDAS DE UN PISO* (Bachelor's Thesis).
- Grantadesign. (2016). CES Edupack.
- Jiménez Iriarte, M. A., & Torres Pertuz, F. A. (2020). *Análisis sistemático de literatura– Analisis de un concreto convencional con un concreto con material alternativo (Bagazo de caña de azúcar)*.
- Kolios, A., Mytilinou, V., Lozano-Minguez, E., & Salonitis, K. (2016). *A comparative study of Multiple-criteria decision-making methods under stochastic inputs*. *Energies*, 9(7), 566.
- Liao, H., & Xu, Z. (2014). *Multi-criteria decision making with intuitionistic fuzzy PROMETHEE*. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 27(4), 1703-1717.

- Martínez, J., Vaca, D., Orozco, M., Montero, A., & Carrión, D. (2015). Aplicación de métodos multicriterio para la selección de materiales para menaje de cocinas de inducción. *Revista Técnica Energía*, 11, 116.
- Martínez-González, M. A., Sánchez-Villegas, & Faulín Fajardo, F. J. (2006). *Bioestadística amigable*. Madrid: Díaz de Santos
- Mayes, R. L., & Naeim, F. (2001). *The Seismic Design Handbook 2nd Edition Ch. 14 Design of Structures with Seismic Isolation*.
- Mendoza, V. (2002). Santiago. *Pasos para elaborar proyectos de investigación científica*.
- Muñoz, B., ROMANA, M., & Ordóñez, J. (2016, June). Análisis de Sensibilidad de una Metodología de Decisión Multicriterio desarrollada para la Selección de Tipologías de Estructuras de Contención en una Autovía Urbana. In XII Congreso de ingeniería del transporte. 7, 8 y 9 de junio, Valencia (España) (pp. 624-629). Editorial Universitat Politècnica de València.
- Murillo, CZ, Hernández, JRH y Vázquez, ML (2019, julio). Análisis multicriterio en el Reglamento de gestión ambiental propuesto para la construcción en Aurora, Guayas, Ecuador. En Conferencia internacional sobre factores humanos aplicados y ergonomía (pp. 101-113). Springer, Cham.
- NEC. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- NEC-15, NEC-SE-DS, Norma Ecuatoriana de la Construcción – Seguridad Estructural – Diseño Sismo Resistente, Norma Ecuatoriana de la Construcción, diciembre 2014.
- NEC-15, NEC-SE-HM, Norma Ecuatoriana de la Construcción – Seguridad Estructural – Estructuras de Hormigón Armado, Norma Ecuatoriana de la Construcción, diciembre 2014
- Portilla Hernández, J. E. (2019). Selección de material a través de técnicas MCDM, para aislantes eléctricos de alta tensión SPB de bobinas de encendido COP. Verificación de resultados mediante simulación y validación experimental.
- Reglero, V. M. M. *Caracterización y Modelización de Laminados Híbridos de Metal-Fibra Natural*.
- Salazar Loor, R. B. (2018). Selección de materiales mediante métodos multicriterio (MCDM) aplicado a la parte lateral de una estructura autoportante para vehículos livianos, verificación mediante simulación FEM.
- Sharma, P. K., Aggarwal, A., & Gupta, R. (1993, December). An expert system for aid in material selection process. In *Proceedings of Engineering Management Society Conference on Managing Projects in a Borderless World* (pp. 27-31). IEEE.

- Soria-López, F. J., & Guerrero-Baca, L. F. (2019). Polín de Bambú Ensamblado: diseño alternativo para la construcción de estructuras ligeras. *Legado de Arquitectura y Diseño*, 14(25), 84-95.
- Stupenengo, F. (2011). Materiales y materias primas. F. Stupenengo, *Materiales y materias primas* (pág. 7). Barranquilla: materiales compuestos.
- Susunaga Monroy, J. M. (2014). Construcción sostenible, una alternativa para la edificación de viviendas de interés social y prioritario (Bachelor's thesis).
- Agarwal, A., Nanda, B., & Maity, D. (2014). Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns. *Computers and Chemical Engineering*, 71, 610–617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.011>
- Akadiri, P. O., Olomolaiye, P. O., & Chinyio, E. A. (2013). Multi-criteria evaluation model for the selection of sustainable materials for building projects. *Automation in Construction*, 30, 113–125. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.10.004>
- Ashby, M. (2010). Materials selection in mechanical design: Fourth edition. In *Materials Selection in Mechanical Design: Fourth Edition* (Vol. 9780080952).
- Cabello, A. (2017). Métodos de decisión multicriterio y sus aplicaciones. *Universidad de La Rioja*, 45.
- Castañeda, Á. E., & Bravo, Y. M. (2017). Overview of the structural behavior of columns, beams, floor slabs and buildings during the Earthquake of 2016 in Ecuador. *Revista Ingenieria de Construccion*, 32(3), 157–172. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732017000300157>
- Chen, Z. S., Martínez, L., Chang, J. P., Wang, X. J., Xionge, S. H., & Chin, K. S. (2019). Sustainable building material selection: A QFD- and ELECTRE III-embedded hybrid MCGDM approach with consensus building. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 85(August), 783–807. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.006>
- Chiner, M. (1988). Planning of expert systems for materials selection. *Materials and Design*, 9(4), 195–203. [https://doi.org/10.1016/0261-3069\(88\)90031-3](https://doi.org/10.1016/0261-3069(88)90031-3)
- Contreras-Miranda, W., Cloquell-Ballester, V., & de Contreras, M. O. (2010). Multicriteria decision making techniques in the selection of structural components from wood technology, for construction of social housing in Venezuela. *Madera Bosques*, 16(3), 7–22. <https://doi.org/10.21829/myb.2010.1631163>
- de la Fuente, A., Blanco, A., Armengou, J., & Aguado, A. (2017). Sustainability based-approach to determine the concrete type and reinforcement configuration of TBM tunnels linings. Case study: Extension line to Barcelona Airport T1. *Tunneling and Underground Space Technology*, 61, 179–188. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.008>

- Del Caño, A., Gómez, D., & De La Cruz, M. P. (2012). Uncertainty analysis in the sustainable design of concrete structures: A probabilistic method. *Construction and Building Materials*, 37, 865–873.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.020>
- García, S. (2015). Bambú Como Material Estructural : Generalidades, aplicaciones y modernización de una estructura tipo. *Bambú Como Material Estructural: Generalidades, Aplicaciones Y Modelización De Una Estructura Tipo*, 12(dificultad de transporte), 52.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arquitectura_con_bambú.JPG
- Imcyc. (2006). Pruebas y resistencia a la compresión del concreto. *Concreto Reforzado Con Fibras*, 13, 67–71.
- Jahan, A., & Edwards, K. L. (2015). A state-of-the-art survey on the influence of normalization techniques in ranking: Improving the materials selection process in engineering design. *Materials and Design*, 65, 335–342.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.09.022>
- Jahan, A., Mustapha, F., Sapuan, S. M., Ismail, M. Y., & Bahraminasab, M. (2012). A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(1–4), 411–420.
<https://doi.org/10.1007/s00170-011-3366-7>
- Jeya Girubha, R., & Vinodh, S. (2012). Application of fuzzy VIKOR and environmental impact analysis for material selection of an automotive component. *Materials and Design*, 37, 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.022>
- Lozano, R. (2008). Envisioning sustainability three-dimensionally. *Journal of Cleaner Production*, 16(17), 1838–1846. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.02.008>
- Mafla, A. B. (2009). Uso de la cascarilla de arroz como material alternativo en la construcción. *Inventum*, 6, 74–78.
- Martínez Gómez, J., Chérrez Troya, M., Llanes Cedeño, E. A., & Peralta Zurita, D. (2018). Métodos multicriterio aplicados en la selección de un material para discos de freno. *Ingenius*, 20, 83–95. <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.08>
- Mejías-Brizuela, N., Orozco-Guillen, E., & Hernández, N. G. (2016). Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, 2(6), 27–41.
- MIDUBI. (2015). NEC-SE-DS Peligro Sísmico: Diseño Sismo Resistente. In *Norma Ecuatoriana de la Construcción*.
<http://www.indeci.gob.pe/proyecto58530/objetos/archivos/20110606102841.pdf>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2016). Estructuras de guadúa (GaK). *Norma Ecuatoriana de La Construcción*, 94.

- Mondragón Barrera, M. A. (2014). Uso De La Correlación De Spearman En Un Estudio De Intervención En Fisioterapia. *Movimiento Científico*, 8(1), 98–104.
<https://doi.org/10.33881/2011-7191.mct.08111>
- Mousavi-Nasab, S. H., & Sotoudeh-Anvari, A. (2017). A comprehensive MCDM-based approach using TOPSIS, COPRAS and DEA as an auxiliary tool for material selection problems. In *Materials and Design* (Vol. 121). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.041>
- Mousavi-Nasab, S. H., & Sotoudeh-Anvari, A. (2018). A new multi-criteria decision making approach for sustainable material selection problem: A critical study on rank reversal problem. *Journal of Cleaner Production*, 182, 466–484.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.062>
- Muñoz Medina, B., & Romana García, M. (2016). Aplicación de métodos de decisión multicriterio discretos al análisis de alternativas en estudios informativos de infraestructuras de transporte. *Pensamiento Matemático*, 6(2), 27–45.
- NEC SE Vivienda. (2015). *VIVIENDAS DE HASTA 2 PISOS CON LUCES DE HASTA 5 m.* 2, 40. <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-VIVIENDA-parte-2.pdf>
- Ortiz, O., Castells, F., & Sonnemann, G. (2009). Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Construction and Building Materials*, 23(1), 28–39.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012>
- Pérez Domínguez, L., Macías García, J., Sánchez Mojica, K., & Luviano Cruz, D. (2017). Comparación Método multi-criterio TOPSIS y MOORA para la optimización de un proceso de inyección de plástico. *Mundo FESC*, 14(14), 98–105.
- Podvezko, V. (2011). The comparative analysis of MCDA methods SAW and COPRAS. *Engineering Economics*, 22(2), 134–146.
<https://doi.org/10.5755/j01.ee.22.2.310>
- Pons, O., & De La Fuente, A. (2013). Integrated sustainability assessment method applied to structural concrete columns. *Construction and Building Materials*, 49, 882–893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.009>
- Rojas, Á. M. T. (2015). *Adición de la fibra de coco en el hormigón y su incidencia en la resistencia a compresión.*
- Sakundarini, N., Taha, Z., Abdul-Rashid, S. H., & Ghazila, R. A. R. (2013). Optimal multi-material selection for lightweight design of automotive body assembly incorporating recyclability. *Materials and Design*, 50, 846–857.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.085>

- San-José Lombera, J. T., & Cuadrado Rojo, J. (2010). Industrial building design stage based on a system approach to their environmental sustainability. *Construction and Building Materials*, 24(4), 438–447.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.019>
- Sánchez, P. C., & Cevallos, D. (2015). Diseño de columnas de hormigón armado en zonas sísmicas Sesimic design of reinforced concrete columns. *Revista de Ciencia*, 17, 241–261.
- Soto, F. (2009). *Diseño de columnas* (p. [Pg. 36; 18]).
- Vazquez, A., Beltrán, M., Perez, M., & Espinosa, R. M. (2016). El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente. *Researchgate*, May, 1–14.
<https://doi.org/10.1111/j.1757-1707.2010.01033.x>
- Zhang, H., Peng, Y., Tian, G., Wang, D., & Xie, P. (2017). Green material selection for sustainability: A hybrid MCDM approach. *PLoS ONE*, 12(5), 1–26.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0177578>
- CES Educpack . (2019). Aprende en línea. Obtenido de Table of performance indices:
http://support.grantadesign.com/resources/cesedupack/2019/learn/topic.htm#t=html%2Fref_indices%2Findices_edulander.htm
- CYPE Cad. Generador de precios Ecuador. (2018). CYPE Ingenieros, S.A. Obtenido de Generador de precios Ecuador:
http://www.ecuador.generadordeprecios.info/obra_nueva/calculaprecio.asp?Valor=0|1_0_0_0_0|7|EHS010|ehs_altplant%20rectangular:c4_0_1c8_0_25_0_0_100c4_0_10c3_0|hormigon%20pilar:c6_0_1_2c6_0c3_1_0_5|ehs_cuan:_119000|acero%20pilar:_0_0_0_0_0_0_3|hor_separa
- Moskoluk, J. M. (18 de Abril de 2017). SlideShare. Obtenido de Hormigón y Hormigón armado: <https://es.slideshare.net/JohannamaiaMoskoluk/hormign-y-hormign-armado>
- Sikadur-32 . (2018). Sikadur 32 Gel-Comp. A. Obtenido de Hoja de Seguridad :
<https://per.sika.com/dms/getdocument.get/ea0dd101-2fc4-3e11-87e5-5900847fea85/HS%20-%20Sikadur%2032%20Gel.pdf>