

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM).

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK

Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas

Maestría en Diseño Industria y de Procesos

Selección de un material para refuerzo de columnas de hormigón ecológico de
obtención nacional por medio de MCDM

Roberto Carlos Villacres Flores

Director: Ing. Javier Martínez, Msc.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Declaración Juramentada

Yo, ROBERTO VILLACRES FLORES, con cédula de identidad 172294818-7, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en el diseño de procesos.

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.

ROBERTO CARLOS VILLACRES FLORES

CI: 1722948187

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Índice de contenido

1. Índice de figuras	6
2. Índice de tablas	8
1. Resumen	10
2. Introducción	12
3. Justificación.....	13
4. Estado del Arte	15
4.1 Impacto Ambiental	15
4.2 Columnas de hormigón empleadas en la construcción de viviendas.....	16
4.3. Materiales Convencionales utilizados para la elaboración de columnas	19
4.4 Materiales Alternativos utilizados en la construcción	20
4.4.1 Ceniza de carilla de arroz	21
4.4.2 Fibras de Pambil	22
4.4.3 Fibras de Banano	23
4.4.4 Fibras de plástico reciclado	24
4.5 Criterio de Diseño.....	25
4.5.1 Densidad	25
4.5.2 Módulo de Young	25
4.5.3 Resistencia a la compresión.....	25
4.5.4 Resistencia a la flexión	26
4.5.5 Limite elástico	26
4.5.6 Resistencia a la tracción	26
4.5.7 Costo.....	26
4.5.8 Energía interna.....	26
4.5.9 Huella de Carbono	26
4.6 Métodos de selección multicriterio (MCDM)	27
4.6.1 Método de ENTROPIA.	27
4.6.2 Método desviación Estándar.....	28
4.6.3 Método AHP.....	28
4.6.4 Método VIKOR	28
4.6.5 Método COPRAS	28
4.6.6 Método TOPSIS	29

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

4.6.7 Coeficiente SPERMAN	29
4.6.8 Análisis de elementos finitos	30
4.6.9 Factor de seguridad	¡Error! Marcador no definido.
5. Metodología	31
5.1 Selección de materiales CES Edupack nivel 3 (Eco desing)	33
5.2 Evaluar y seleccionar el material adecuado	36
5.3 Definir las variables del material a ser evaluadas	37
5.4 Seleccionar el método multicriterio	40
5.4.1 Método de ENTROPIA	40
5.4.2 Método Desviación Estándar	42
5.4.3 Método AHP	42
5.4.4 Método VIKOR	44
5.4.5 Estabilidad Aceptable y ventaja aceptable VIKOR	45
5.4.6 Método COPRAS	46
5.4.7 Método TOPSIS	48
5.4.8 Coeficiente de SPEARMAN	50
5.5 Elaboración de prototipo virtual de la columna	51
5.6 Desarrollar un mallado estructurado para la columna	53
5.7 Establecer condiciones de borde	55
5.8 Simulación del prototipo de columna	56
5.9 Verificar los resultados obtenidos	57
6. Análisis y Presentación de resultados	60
6.1 Resultados Obtenidos en CES Edupack nivel 3 (Eco desing)	60
6.2 Aplicación de métodos multicriterio por ponderación de pesos	61
6.2.1 Método de entropía	61
6.2.2 Método de desviación estándar	64
6.2.3 Método AHP	66
6.2.4 Resultados de los Métodos de Ponderación	69
6.2.5 Método VIKOR	71
6.2.6 Resultados Método VIKOR	73
6.2.7 Método COPRAS	74
6.2.8 Resultados Método COPRAS	77
6.2.9 Método TOPSIS	78
6.2.10 Resultados del método TOPSIS	80

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

6.3 Resultados de métodos multicriterio	81
6.4 Coeficiente SPEARMAN	82
7.1 Resultados de simulación estática.....	84
7.1.1 Resultado de factor de seguridad.....	¡Error! Marcador no definido.
7.1.2 Resultado de esfuerzo-deformación, Von Mises	89
7.1.3 Resultados de desplazamiento	90
7.1.4 Comparación de resultados.....	91
7. Conclusiones.....	94
8. Recomendaciones.....	95
9. Bibliografía.....	96

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

1. Índice de figuras

Figura 1. <i>Tipos de columnas de concreto</i>	18
Figura 2 <i>Tipos de fallas en ensayos de compresión</i>	18
Figura 3 <i>Ceniza de cascarilla de arroz</i>	21
Figura 4 <i>Fibras de pambil implementadas en el concreto</i>	22
Figura 5 <i>Fibras de banano</i>	23
Figura 6 <i>Bloques de plástico reciclado</i>	24
Figura 7 <i>Flujograma de procesos a efectuar centrado en la selección multicriterio</i> ..	32
Figura 8 <i>Selección de nivel Eco Design</i>	33
Figura 9 <i>Módulo de materiales compuestos Synthesuzer</i>	34
Figura 10 <i>Modelo para fibra continua</i>	34
Figura 11 <i>Compuesto para fibra continua</i>	35
Figura 12 <i>Prototipo virtual de la columna</i>	52
Figura 13 <i>Detalle de fibras en la columna</i>	53
Figura 14 <i>Condición de carga</i>	55
Figura 15 <i>Carga aplicada en la columna de hormigón</i>	57
Figura 16 <i>Simulación columna de concreto con fibras incorporadas y sin fibras incorporadas</i>	58
Figura 17 <i>Workbench de ANSYS</i>	59
Figura 18 <i>Módulo de edición de material</i>	59
Figura 19 <i>Resultados gráficos de métodos de ponderación de pesos</i>	71
Figura 20 <i>Resultados gráficos del método VIKOR</i>	74
Figura 21 <i>Resultados gráficos del método COPRAS</i>	77
Figura 22 <i>Resultados gráficos del método TOPSIS solución ideal</i>	81

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 23 <i>Resultados gráficos de cada método</i>	82
Figura 24 <i>Análisis grafica de correlación Spearman</i>	84
Figura 25 <i>Fuerza ejercida sobre la columna de concreto</i>	85
Figura 26 <i>Calidad del elemento</i>	85
Figura 27 <i>Resultado de mallado</i>	86
Figura 28 <i>Esfuerzo de Von Mises columna de concreto</i>	87
Figura 29 <i>Desplazamiento columna de concreto</i>	88
Figura 30 <i>Esfuerzo-deformación del concreto con cascarilla de arroz</i>	89
Figura 31 <i>Desplazamiento principal de la columna con ceniza de cascarilla de arroz</i>	91
Figura 32 <i>Resultados de simulación en comparativa</i>	93

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

2. Índice de tablas

Tabla 1. <i>Materiales convencionales utilizados para la elaboración de columnas.....</i>	20
Tabla 2 <i>Fracción volumétrica de fibras.</i>	36
Tabla 3 <i>Propiedades de los materiales ecológicos con hormigón</i>	37
Tabla 4 <i>Propiedades de las fibras con concreto</i>	38
Tabla 5 <i>Propiedades de las fibras con concreto y synthesizer.....</i>	39
Tabla 6 <i>Ponderación de los criterios.....</i>	43
Tabla 7 <i>Correlación en función del rango.</i>	51
Tabla 8 <i>Características del mallado.....</i>	54
Tabla 9 <i>Propiedades de las fibras con concreto con la herramienta synthesizer de CES EduPack.....</i>	60
Tabla 10 <i>Matriz de fibras y propiedades</i>	61
Tabla 11 <i>Resultados del cálculo de entropía.....</i>	62
Tabla 12 <i>Pesos obtenidos del método Entropía</i>	63
Tabla 13 <i>Resultados del cálculo de desviación estándar</i>	64
Tabla 14 <i>Pesos obtenidos del método desviación estándar.....</i>	65
Tabla 15 <i>Matriz de decisión del método AHP</i>	66
Tabla 16 <i>Matriz por selección de pesos.....</i>	66
Tabla 17 <i>Resultado de Matriz normalizada.....</i>	67
Tabla 18 <i>Pesos obtenidos del método AHP.....</i>	67
Tabla 19 <i>Matriz de relación de consistencia.....</i>	69
Tabla 20 <i>Resultados de métodos de ponderación de pesos.....</i>	70
Tabla 21 <i>Resultado de mejores y peores valores método VIKOR.....</i>	72
Tabla 22 <i>Resultados de soluciones optimas VIKOR.....</i>	72

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 23 <i>Resultados obtenidos método VIKOR</i>	73
Tabla 24 <i>Pesos normalizados</i>	75
Tabla 25 <i>Resultado de prioridades relativas</i>	76
Tabla 26 <i>Ranking de soluciones método COPRAS</i>	76
Tabla 27 <i>Soluciones ideales positivas y negativas</i>	78
Tabla 28 <i>Valores de soluciones positivas y negativas</i>	79
Tabla 29 <i>Ranking de fibras ganadoras método TOPSIS</i>	79
Tabla 30 <i>Resultado de cada método en forma de ranking</i>	82
Tabla 31 <i>Resultados de correlación Spearman</i>	83
Tabla 32 <i>Características mecánicas de la columna de concreto</i>	87
Tabla 33 <i>Esfuerzo-deformación, Von Mises de la columna de concreto con fibras</i>	90
Tabla 34 <i>Desplazamientos de la columna de concreto con fibras</i>	91
Tabla 35 <i>Resultados de energía y huella de carbono</i>	92
Tabla 36 <i>Resultados de simulación de la columna con fibras con concreto</i>	93

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

1. Resumen

EL desarrollo la urbanización tiene un papel importante en la actualidad reflejándose en aumento de la construcción de viviendas donde esto conlleva a un incremento de la explotación de materiales pétreos y materiales de contricción. Esto conlleva a un aumento de la erosión de los suelos y contaminación que se genera por la maquinaria utilizada para su producción. Por lo que el presente estudio tiene el objetivo de solucionar un material ecológico como refuerzo para la columna de concreto que satisfaga necesidades en el marco ecológico y de construcción empleado los métodos multicriterio en base a seleccionar el mejor material que cumpla con las normas de construcción para minimizar el uso de materiales.

Se obtiene características del nuevo material ecológico utilizando el software CES Edupack aplicando el módulo synthesizer donde se logra conseguir las propiedades mecánicas, físicas y costos de los materiales ecológicos al ser mezclados con concreto.

Estas características se utilizaron en el análisis de los métodos multicriterio (TOPSIS, COPRAS y VIKOR) donde se establecen indicadores de resultados para determinar el material idóneo donde se resuelve que el material ganador es la ceniza de cascarilla de arroz debido a que este material aporta positivamente a la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y tracción. El material ganador obtiene resultados positivos en la simulación estática al mostrar una deformación máxima de 0.026 mm en su zona más crítica y un esfuerzo máximo de 0.234 MPa, estos resultados no comprometen la estabilidad estructural del elemento.

Palabras Clave:

Esfuerzo, columna, viviendas, erosión, material ecológico, métodos.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Abstract

The development of urbanization plays an important role today, reflected in the increase in housing construction, which leads to an increase in the exploitation of stone materials and construction materials. This leads to an increase in soil erosion and contamination generated by the machinery used for its production. Therefore, the present study has the objective of solving an ecological material as reinforcement for the concrete column that satisfies needs in the ecological and construction framework using multicriteria methods based on selecting the best material that complies with the construction standards to minimize the use of materials.

Characteristics of the new ecological material are obtained using the CES Edupack software by applying the synthesizer module where the mechanical, physical and cost properties of the ecological materials when mixed with concrete are obtained.

These characteristics were used in the analysis of the multi-criteria methods (TOPSIS, COPRAS and VIKOR) where indicators of results are established to determine the ideal material where it is resolved that the winning material is rice husk ash because this material contributes positively to the compressive strength, flexural strength and tensile strength. The winning material obtains positive results in the static simulation by showing a maximum deformation of 0.026 mm in its most critical zone and a maximum stress of 0.234 MPa, these results do not compromise the structural stability of the element.

Keywords:

Stress, column, houses, erosion, ecological material, methods.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

2. Introducción

Dentro de un mundo en desarrollo la urbanización tiene un papel importante ya que el aumento de la construcción de viviendas se ha transformado en una de las principales actividades que ha impulsado el crecimiento económico del siglo XXI. Un estudio realizado por las Naciones Unidas revela que cerca del 54 % de la población mundial habita en las ciudades, y se proyecta que para el 2030 esta cifra aumente en un 60% (Godoy, 2018).

La construcción de viviendas causa un incremento en el uso de materiales como son el ladrillo, bloques, concreto y materiales pétreos. Esto a su vez conlleva una repercusión en el medio ambiente como consecuencia de la erosión de los suelos provocada por su extracción. En este contexto, se debe tener una idea de cómo se puede reducir estos elementos en la construcción de viviendas contribuyendo a reducir la explotación de recursos naturales y la sobre explotación de agua. Para ello las definiciones de sustentabilidad deben lograr objetivos económicos, ambientales y sociales, ya que esto dictaminan la relación que existe entre los materiales de uso de construcción y el cuidado del medio ambiente (Romero, Irarrázaval, Opazo, Salgado, y Smith, 2016).

Por otra parte, la sostenibilidad en la ingeniería propone como solución prioritaria la aplicación de diferentes materiales ecológicos como lo son compuesto de hormigón con plástico reciclado, hormigón con ceniza de cascarilla de arroz, fibra de banano y fibra de pambil para mejorar el refuerzo en columnas de hormigón. El material que se propone como refuerzo ayudara a disminuir la cantidad de componentes habituales en la construcción de edificaciones y así también disminuir posibles

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

efectos adversos como la erosión del suelo, el desgaste de las minas por la explotación de los materiales pétreos (ripio, piedra, arena, cascajo) y la contaminación de CO₂ por parte de la maquinaria usada para poder obtener estos materiales, dando como resultado una afección al medio ambiente (Fraga, 2015).

Con la finalidad de seleccionar el material correcto para refuerzo de la columna, actualmente existen métodos multicriterio que permiten realizar esta tarea de una mejor manera mediante la selección de un material apropiado por medio del método multicriterio (MCDM) el cual permite obtener resultados que permitan identificar opciones alternativas como lo son las cascarilla de arroz, el polín de bambú, compuestos de hormigón con plástico, varilla de fibra de banano para estructurar y reforzar una columna (Molina, 2019).

3. Justificación

Este estudio se lleva a cabo debido la necesidad de realizar un análisis de varios materiales ecológicos que existen en distintas regiones del país como fuentes para el refuerzo de materiales de construcción. Esto se debe a que la selección de materiales enfocados en la sostenibilidad es un proceso complicado debido a que se debe tomar en cuenta múltiples factores encargados de la seguridad del usuario al igual que lo dictamina las normas INEC (Melrose, Perroy & Careas, 2015).

En la actualidad el aumento de las construcciones se refleja en la implantación columnas de hormigón las cuales se funden de materiales pétreos donde se creara más erosión en los suelos, estableciendo una sobre explotación de recursos mineros y el aumento de dióxido de carbono.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Debido a ello el estudio se basa en la selección de materiales ecológicos y materiales reciclados ya que se desea reducir el deterioro del suelo, así también disminuir la huella de carbono producido por la maquinaria que extrae el material y lo procesa.

Por otra parte, los análisis multicriterio están inmersos en la toma de decisión ya que estos permiten escoger el material adecuado teniendo en cuenta la función que este va a desempeñar dentro de la estructura de la columna de hormigón. Es por ello que este estudio tiene como objetivo seleccionar varios materiales ecológicos que servirán como refuerzos en la creación de columnas de hormigón.

De esta manera se obtendrán datos de las propiedades mecánicas y consumo energético de los compuestos teniendo en cuenta la reducción huella de carbono que se podría aminorar obteniendo un resultado favorable en la reducción de precios de construcción.

Objetivo General

Seleccionar un material ecológico para refuerzo de columnas de hormigón de obtención nacional por medio de método de selección multicriterio para mejorar la resistencia de la columna, garantizando la fiabilidad que pueda ser implementada en la construcción.

Objetivo Específicos

Realizar un estudio del arte para establecer las variables de diseño que influyan en la resistencia de la columna de hormigón con nuevos materiales que aporten fortaleza por medio de métodos de selección.

Evaluar distintos materiales ecológicos para el refuerzo de columnas de hormigón por medio de métodos de selección de multicriterio.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Diseñar un prototipo virtual de la columna implementando materiales ecológicos y hormigón mediante un modelado 3D.

Validar la alternativa ganadora que cumpla con necesidades estructurales de la columna por medio del análisis de las características mecánicas y físicas en el ANSYS versión estudiante.

4. Estado del Arte

4.1 Impacto Ambiental

En la actualidad la problemática sobre el impacto ambiental se da a causa de los desperdicios de las industrias y los seres humanos, generando así diversos daños al ecosistema siendo los plásticos los que más daño ocasionan al medio ambiente, esto se determina mediante varios tipos de estudios realizados, sin embargo, existen otros factores que fomentan el aumento de la contaminación como es la sobreexplotación de materiales pétreos lo que causa contaminación en los ecosistemas fluviales (Cueva, 2020)

Por otra parte, está el ciclo de vida de los materiales inorgánicos como lo es el plástico y entre otros componentes ya que estos se derivan de las actividades relacionadas con la producción de la industria. Para esto se toma en cuenta una metodología del análisis del ciclo de vida de materiales implementados en la construcción de edificaciones o en la manufactura de productos. Los productos inorgánicos están ligados al ciclo de vida ya que esto permite tener una evaluación sistemática del impacto que estos tengan con el ecosistema, con esto se logra clasificar por categorías obtenido así información de la disminución de recursos no renovables y la toxicidad que causan al planeta. El análisis de ciclo de vida se enfoca en considerar varios aspectos del ambiente para determinar un

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

mejor proceso y producto el cual minimice efectos colaterales en el Planeta (Vazquez, Beltrán, Espinosa, & Velasco, 2016).

En la actualidad la industria de la construcción mueve una fuerte reactivación socioeconómica ya que esta mejora la calidad de vida de la población, pero causa variaciones que provocan una desproporción en el ecosistema dado a esto el crecimiento desmesurado de viviendas en zonas urbanas y rurales a consecuencia de la sobre explotación de recursos naturales renovables y no renovables por la alta demanda de material pétreo para la construcción de edificaciones , la erosión de los suelos y contaminación de grandes cantidades de agua (Hernández Jatib, Naísma; Ulloa Carcasés, Mayda; Rosario Ferrer, 2011).

Ante esta realidad de las condiciones de contaminación y sobre explotación de recursos a consecuencia del aumento de edificaciones se va a seleccionar un material para el refuerzo de columnas de hormigón ecológico de obtención nacional por medio del análisis multicriterio y softwares de diseño con el fin de obtener el mejor material ecológico para el refuerzo de columnas.

4.2 Columnas de hormigón empleadas en la construcción de viviendas

Las columnas son estructuras en forma vertical que están sometidas a cargas, las cuales sirven de apoyo para sostén de una edificación. Son utilizadas ampliamente en la arquitectura de edificaciones permitiendo la distribución de peso de la construcción y obteniendo una buena distribución de espacio, así también soporta cargas vivas de eventos naturales y cargas muertas dentro del inmueble (Cevallos Cevallos & Cordero Acosta, 2020).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

La capacidad de carga está limitada por su forma, su correcto dimensionamiento, distribución y composición de los materiales todos estos factores intervienen en su correcta funcionalidad.

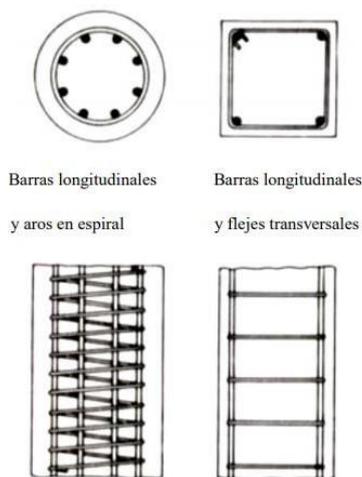
Por otra parte, al enfocarnos en las cargas que soportan las columnas son elementos que se caracterizan por estar sometidas a varios momentos flectores y cargas axiales a la misma vez de tal forma que se produce una flexo-compresión estos factores que se debe tomar en cuenta en el momento de la construcción de la columna y los elementos que la componen como se muestra en la figura 1 (Torrise, Crisafulli, y Pavese, 2012).

Las columnas al ser elementos de apoyo deben tener resistencia, estabilidad, funcionalidad ya que debe ser capaz de resistir fuerzas de forma segura dentro del rango elástico. Estos elementos se encargan de transmitir las cargas que tenga la edificación hasta la planta principal y posteriormente se transmite al suelo promedio de los cimientos. Las columnas se clasifican por su geometría y la disposición del refuerzo donde se clasifican en columnas rectangulares con refuerzos longitudinal donde sus estribos laterales y las columnas circulares con refuerzos longitudinales y en espiral con estribos. Al existir desplazamientos en la columna se puede provocar falla en el material a consecuencia de sobrepasar el límite de fluencia por las cargas de aplastamiento en la superficie de compresión provocando una inestabilidad estructural. Al existir esta falla se pone en riesgo la estabilidad estructural de la edificación de los ocupantes que estén dentro de ella (Caiza Sánchez & Viera Arroba, 2019).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 1.

Tipos de columnas de concreto.



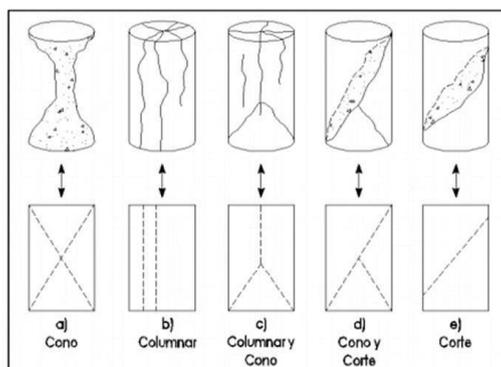
Fuente : (Suárez Hidalgo, 2012).

Por otro lado, el hormigón convencional está enfocado a soportar el peso de la estructura, tensión, flexión y la resistencia a la compresión.

La resistencia a la compresión se define como el esfuerzo permisible que soportan las estructuras al ser sometidas a cargas de aplastamiento antes de llegar a la zona de ruptura como se muestra en la figura 2 (Unapucha, 2019).

Figura 2

Tipos de fallas en ensayos de compresión



Fuente : (Juan Muñoz, 2014).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

En este estudio se define la resistencia adecuada a la compresión de hormigones (210 Kg/cm^2) así obteniendo una mezcla idónea que se relaciona por la implementación de agua y cemento, ya que con estos factores tendrán incidencia en su resistencia, el nivel de compactación y la cantidad adecuada de agregados que mejorarán sus condiciones estructurales (Unapucha, 2019).

4.3. Materiales Convencionales utilizados para la elaboración de columnas

Las propiedades de los materiales empleados para la construcción de edificaciones establecen el área de aplicación, es por ello por lo que el hormigón se emplea para su formación cemento, arena y ripio que se caracterizan por tener una buena resistencia mecánica a la compresión. Al ser materiales que soportan elevados esfuerzos estos logran un desempeño satisfactorio al transmitir cargas hacia los cimientos de la estructura (Páez, 1986).

Dentro del análisis de estructuración de la columna el cemento constituye un material importante por sus propiedades mecánicas y físicas. Este tipo de cemento hidráulico está constituido por silicato de calcio hidráulico el cual está constituido de sulfato de calcio y piedra caliza al 5 % que al ser mezclado con agua y arena alcanza una resistencia de 55 MPa. Los requisitos que debe cumplir se dictaminan por la norma NTE INEN 152 (INEN, 2012).

Otro material que constituye la columna de hormigón es la arena gruesa que contiene partículas que van desde 0.5 mm a 5 mm, las cuales se clasifican por sus dimensiones como se muestra en la tabla 1 y no presentan cambios físicos ni químicos al interactuar con el agua (Manuel y Robles, 2017).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 1.

Materiales convencionales utilizados para la elaboración de columnas.

Denominación	Tamaño
Arena Gruesa	5 mm a 0.5 mm
Arena Fina	0.5 mm a 75 μ m
Arcila	75 μ m

Fuente : (Juna Pozo, 2021)

Los agregados como lo es el ripio definen en gran parte la resistencia final de la mezcla, así también reduce el contenido de cemento por metro cúbico ya que este material tiene un aporte del 65 % a 70 % del resultado final de la mezcla.

Al implementar la arena, agua, ripio y cemento se obtiene una mezcla que tarda 28 días de curado obteniendo una resistencia a la compresión de 16.27 MPa. Para obtener este resultado se emplea un saco de 50 Kg de cemento Holcim, 25 litros de agua, 2 parihuelas de área seca y 2.5 parihuelas de ripio seco (Juna Pozo y Patricio, 2021).

4.4 Materiales Alternativos utilizados en la construcción

La inclusión de materiales ecológicos en la construcción de columnas de hormigón pretende ser una solución de aprovechamiento a materiales que al momento de ser procesados de cierto modo son representados como desechos, esto a partir de optimizar recursos para poder mitigar la contaminación.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

4.4.1 Ceniza de carilla de arroz

La implementación de la cascarilla de arroz en columnas de hormigos se da a partir de obtener un beneficio del material de desecho a consecuencia de la obtención del grano de arroz para el consumo humano. Este material se caracteriza para mejorar el aislamiento de ruido, buen aislante térmico, bajo peso, capacidad de absorción de cargas y gran factibilidad de ser procesado como se muestra en la figura 3 (Molina Salas, 2010).

Figura 3

Ceniza de cascarilla de arroz



Fuente : (Cardenas, 2019)

La cascarilla es un subproducto producido por el proceso de molienda del grano de arroz que está constituido por dos glumas o cáscaras. Este desperdicio ecológico se da en grandes volúmenes a consecuencia que no tiene un uso estipulado, desechando en campos abiertos donde se incinera generando contaminación al medio ambiente. La cascarilla está compuesta básicamente por dióxido de silicio, el cual se obtiene exponiendo este material a un proceso térmico que alcanza los 800 ° C en un horno durante un período de una hora en el cual se optime la sílice con un alto grado de pureza que va a variar entre el 87% – 97 % en forma de ceniza (Camargo y Higuera , 2017).

La sílice se utiliza como sustituto parcial del cemento Holcim M1 en mezclas de concreto hidráulico ya que este elemento químico refleja un incremento en la resistencia

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

a la flexión y compresión. El estudio de (Camargo y Higuera , 2017) detalla suministrar el 5 % de sílice como sustitución del cemento se obtiene un promedio de 35.17. MPa de resistencia a la compresión. Por otra parte, el estudio también determina la resistencia a la flexión en 28 días es de 4.49 MPa, una densidad de 3.08 (g/cm³) y resistencia a la tracción de 3.48. (Gautam, Batra, y Singh, 2019) detalla un precio de 0.67 USD/kg en la fibra con concreto.

4.4.2 Fibras de Pambil

El pambil es un árbol perteneciente a la familia de las palmeras que se encuentra en las zonas tropicales de América, estos árboles crecen en la orilla de los ríos y pueden alcanzar los 25 metros, dándose a notar por la forma de sus raíces que salen de la base del suelo en forma de cono hasta 1 metro como se muestra en la figura 4.

Figura 4

Fibras de pambil implementadas en el concreto.



Fuente : (Rivadeneira, 2016)

La orientación, longitud de cada una de las fibras ayuda a disminuir la fisuración, las geometrías de sus fibras se relacionan directamente a la resistencia y a la tracción que tenga este material al ser implementado en la columna de hormigón. Al hablar de sus propiedades mecánicas la densidad de su capa exterior aumenta progresivamente hasta su copa y sus fibras ayudan a tomar consistencia en su estructura, gracias a esto se

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

emplean como material en la construcción de viviendas gracias a su alta resistencia a la flexión (Rivadeneira, 2016).

El estudio de (Alvarado, 2014) muestra que al suministrar el 2.5 % en el concreto se obtiene un promedio de 29.97 MPa de resistencia a la compresión y resistencia a la flexión de 3.64 MPa a los 28 días. La investigación de (Caizaguango y Terán, 2020) determinan una resistencia a la tracción de 3.10 MPa y con una densidad de 2283(Kg/m³).

4.4.3 Fibras de Banano

El banano es una planta de la familia de las musáceas que se cultivan en zonas templadas y tropicales. Está dotado de un tallo grande que se desarrolla cuando la planta comienza a florecer de donde se extrae su fibra como se muestra en la figura 5 y posteriormente se la deja secar a temperatura ambiente.

Figura 5

Fibras de banano



Fuente : (Fraga, 2015)

Las fibras de banano al ser empleadas como refuerzos en las columnas deberán mejorar la resistencia y rigidez del material resultante, esto depende de la calidad de crecimiento de la planta y el modo de extracción de las fibras. Las propiedades mecánicas de las fibras dependen de la composición química de los constituyentes en una fibra. Cada uno

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

de estos componentes contribuyen en un grado diferente a las propiedades y los efectos en función de su importancia. Donde el objetivo es mejorar las características mecánicas al incorporar la fibra de banano con otros materiales (Fraga, 2015).

El estudio de (Tualombo, 2015) demuestra que al añadir 5 % de fibra de banano en la mezcla de hormigón, siendo esta la que mejor resultado presenta, se obtiene un promedio de 5.20 MPa de resistencia a la compresión, 1.72 MPa de resistencia a la flexión, resistencia a la tracción es de 10 MPa y una densidad de 1730 (Kg/m^3) y con un precio de 0.070 USD/kg.

4.4.4 Fibras de plástico reciclado

La utilización de plástico reciclado mediante refuerzos en la construcción tiene buenas características en base a la estructura de la vivienda siendo así también una opción para minimizar el impacto ambiental de los plásticos en el ecosistema teniendo como resultado una arquitectura sostenible. Este material tiene como características el aislamiento térmico, control de fisuración y reducción de la densidad, pero mantienen una resistencia baja al comparar con materiales tradicionales y un aumento de rigidez con lo que aumenta su fragilidad (Piñeros & Herrera, 2018).

Figura 6

Bloques de plástico reciclado



SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Fuente : (Moncayo, 2018)

(Piñeros y Herrera, 2018) detalla que al añadir 25 % de plástico reciclado en la mezcla de concreto se obtiene una resistencia a la compresión de 5.19 MPa. Mientras que el estudio de (Mora Chacón, 2016) muestra que el concreto con plástico reciclado PET tiene una densidad de 1790 (Kg/m^3). El estudio de (Infante y Valderram, 2019) señala que al añadir 20 % de plástico reciclado se obtiene una resistencia a la flexión de 3.60 MPa, esta investigación se tomó en cuenta ya que el valor del porcentaje de fibra añadida es el más cercano a 25 %.

4.5 Criterio de Diseño

4.5.1 Densidad

Esta característica menciona la cantidad de masa por unidad de volumen que tiene un cuerpo determinado el cual indica el peso por metro cubico de un material determinado (Kassimali, 2015).

4.5.2 Módulo de Young

Al existir esfuerzos los cuales varían linealmente en el material a consecuencia de fuerzas o presiones se determina un parámetro que muestra la relación de comportamiento entre la zona elástica ya que para una columna es imprescindible conocer este factor (Kassimali, 2015).

4.5.3 Resistencia a la compresión

Se define como el esfuerzo máximo que tolera una columna a un esfuerzo de compresión bajo las acción de cargas externas (Kassimali, 2015).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

4.5.4 Resistencia a la flexión

Este criterio se define como el resultado de la relación de la carga, la fuerza cortante vertical y el momento flector y la curva de la flexión real de la viga en consideración a su posición original (L. Mott, 2004).

4.5.5 Limite elástico

Esta característica mecánica se da como resultado de la deformación lineal de los cuerpos a consecuencia de los esfuerzos cortantes y tensiones (L. Mott, 2004).

4.5.6 Resistencia a la tracción

Es el esfuerzo que se considera en el punto máximo en la curva de esfuerzo-deformación en un sentido unidireccional, antes que el elemento llegue a la zona plástica y que se produzca una rotura (L. Mott, 2004).

4.5.7 Costo.

El material implementado debe cumplir con los requerimientos del cliente y debe tener un precio asequible identificando los factores funcionales que se requiere en la construcción de la columna (L. Mott, 2004).

4.5.8 Energía interna

La energía necesaria para fabricar un Kg de materia a partir de materias primas o materiales (EduPack, 2019) .

4.5.9 Huella de Carbono

La masa de CO₂ equivalente al efecto invernadero producida la cual se libera a la atmósfera ha consecuencia de la producción de un 1k de materia (EduPack, 2019).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

4.6 Métodos de selección multicriterio (MCDM)

En el campo de la ingeniería se considera la necesidad de apoyarse en parámetros para la toma de decisiones ya que es necesario centrarse en los recursos empleados y el tiempo que se tomó en el estudio del diseño y planificación. Esto involucra la necesidad de resolver un problema eligiendo una de varias alternativas buscando la mejora de calidad y eficiencia en cuanto al material y diseño (Molina, 2019).

Existen varios métodos enfocados para la toma de decisión conforme a la aplicación que va a desempeñar el material en la estructura o diseño que se lo emplee. En la actualidad estos estudios se aplican a la elección de materiales alternativos como lo son VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija Kompromisno Resenje), TOPSIS (Technique for Order Preference), COPRAS (Complex Proportional Assessment) y Entropía (Molina, 2019).

4.6.1 Método de Entropía.

La entropía verifica el tamaño de incertidumbre que se genera en un experimento utilizando la teoría de probabilidad la cual permite medir o valorar la aleatoriedad en condiciones más exactas. Donde la medición de la información debe tener continuidad y los resultados posibles son igualmente probables. (Martínez Gómez, Chérrez Troya, Llanes Cedeño, y Peralta Zurita, 2018).

El estudio realizado por (Martínez Gómez et al., 2018), implementa el método de Entropía para la investigación de nuevos materiales que mejoren la eficiencia de frenado y proveen mayor estabilidad seleccionando un material alternativo al hierro fundido donde se especifica que el ASTM A536, con esto se consigue mejorar sus características tales como la disminución del consumo de combustible en correlación a su peso específico.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

4.6.2 Método Desviación Estándar

Es un método estadístico que consiste en identificar los cambios que tenga una estructura, este es considera la identificación del promedio de valoración en consideración de los datos al punto central (Jahan, Mustapha, Sapuan, Ismail, & Bahraminasab, 2012).

4.6.3 Método AHP

Este método implementa un proceso de jerarquía analítica para la toma de decisiones al tener múltiples criterios creando una mezcla de decisiones cuantitativas y cualitativas las cuales interviene en la toma de decisiones (Taherdoost y Group, 2017)

4.6.4 Método VIKOR

El concepto básico es proporcionar un conjunto determinado de alternativas donde se plantea definir las soluciones ideales positivas y negativas. Este método propone evaluar o puntuar por separado los resultados positivos con un valor más elevado (100) en tanto que la solución negativa se indica con valor o puntuación más baja (0). (Martínez Gómez et al, 2018).

Este método fue implementado en el estudio de (Salas, 2017) para determinar que al usar 20 % de fibra de Bambú se puede sustituir al plástico ABS-PC en la fabricación por inyección de plástico da la rejilla de ventilación del Kia Rio.

4.6.5 Método COPRAS

Este método examina y permite buscar de mejor manera el valor del rendimiento de las alternativas las cuales tengan los mejores resultados con respecto a los diferentes criterios y ponderaciones, considerando las soluciones ideales y no ideales (Salas, 2017).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

El estudio realizado por (Salazar-Loor, Martínez-Gómez, Rocha-Hoyos, & Llanes-Cedeño, 2019) utilizó el método COPRAS para la selección de un material adecuado para la parte lateral estructural de un vehículo siendo este el Acero Martensítico YS1200 obteniendo un rendimiento en el aprovechamiento del material y mayor eficiencia.

4.6.6 Método TOPSIS

El estudio de (Pérez Domínguez et al, 2017) se enfoca en elegir alternativas de solución más cercana de la solución ideal positiva de valoración y de la misma forma alejarse del resultado negativo. El resultado positivo se detalla como la solución ideal donde se eleva los criterios de beneficio, por lo contrario, la solución ideal negativa se la disminuye los criterios beneficiosos.

Los valores ideales y no ideales son respuestas artificiales las cuales demuestran posición de cada estimación a la que se pretende llegar y valorar.

Al tener en cuenta este método se puede mencionar el trabajo realizado por (Fraga, 2015) el cual determinó que al implementar el 5% de fibra de banano en una matriz de resina de poliéster se presenta mejores características mecánicas en la aplicación de una moldura del panel un auto modelo optra 1.8.

4.6.7 Coeficiente Spearman.

Es necesario utilizar la correlación SPERMAN al finalizar el análisis empleando los métodos multicriterio para validar los resultados obtenidos. Se considera utilizarlo cuando los valores presentan incertidumbre entre las alternativas propuestas en el estudio.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

El coeficiente de correlación establece valores estimados de -1 y +1 teniendo un incremento positivo y valores negativos correspondientes a una clasificación no aceptada con lo cual los valores positivos al presentar un aumento rango y valores negativos decrecen. Al tener un valor de 0 no existe ninguna correlación (Ortega, 2009).

La investigación realizada por (Molina, 2019) implementa el método Sperman determina que el polibutileno tereftalato es el material valido para la fabricación de manijas de apertura interna del vehículo.

4.6.8 Análisis de elementos finitos

El método de análisis por elementos finitos (FEA) se enfoca en la construcción de diseños complejos a través de elementos simples y manejables (elementos finitos). Se proporciona una forma de probar virtualmente al producto y a comprender el comportamiento mecánico de la estructura o elemento ayudando así al desarrollo de nuevos materiales (Moaveni, 2007).

Para la resolución de nuevos diseños y productos dentro de la Ingeniería se emplea el método de elementos finitos con el propósito de responder a los requerimientos técnicos, mecánicos y de seguridad por medio de la simulación aplicando la resolución de modelos matemáticos en muchos problemas de Ingeniería. El análisis por medio de FEA parte del análisis de un número finito de puntos, llamados nodos los cuales por medio de una configuración de malla permite resolver y calcular factores como el desplazamiento, deformaciones, tensiones, etc. (Chen & Liu, 2014).

Por otra parte, el mallado se da por el análisis de tensión plana o deformación plana en la superficie o sección transversal de la estructura 3-D, esto se obtiene por medio de una discretización de elementos donde se emplean triángulos, cuadrados y una mezcla de

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

ambos. La estructuración de elementos se especifica mediante las cargas o esfuerzos y simetría del sólido. Esto se realiza mediante una malla de superficie estructurada la cual tiene conectividad formando una malla 2-D en cada superficie del cuerpo ya que con ello se obtiene mejor confiabilidad de la solución (Moaveni, 2007).

Para una buena selección de mallado se debe tener en cuenta la densidad de malla y la calidad de forma de elemento. Por otra parte, las mallas más finas se emplean en áreas donde se esperan altas tensiones y deformación ya que estas zonas requieren mayor número de nodos para un mejor resultado (Chen & Liu, 2014).

5. Metodología

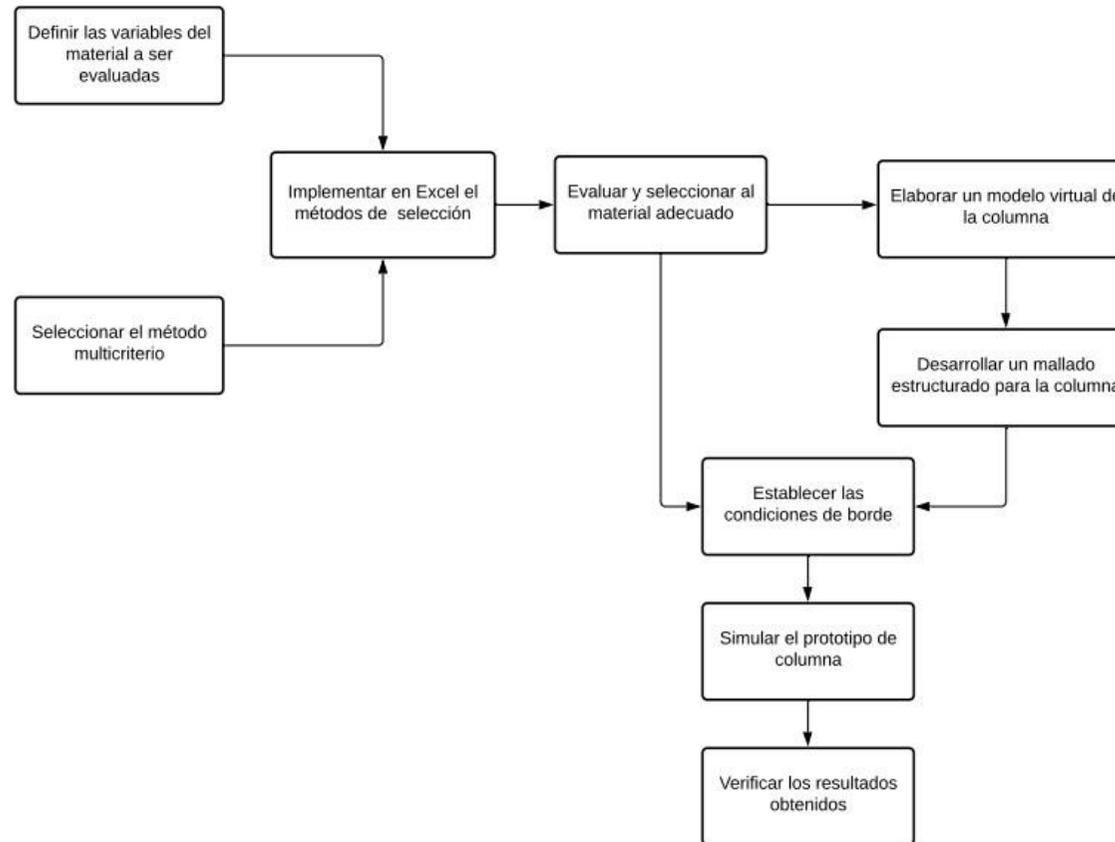
En el presente estudio se plantea el análisis de selección por medio de MCDM empleando diferentes procedimientos para la selección apropiada de un material ecológico que brinde buenas características mecánicas al ser mezclado con el hormigón. Al obtener un material ganador por medio de los métodos multicriterios como lo son: VIKOR, TOPSIS, COPRAS Y ENTROPIA se debe evaluar y corroborar mediante una simulación asistida por computadora. Al hablar de selección de materiales alternativos que se realiza en el presente estudio se denota el uso de la caracterización de materiales ecológicos en el concreto a las necesidades requeridas en la implementación de materiales ecológicos como refuerzos en columnas de hormigón.

La implementación de los materiales ecológicos integrados a la columna como refuerzos propuestos en este estudio está enfocado en cumplir las normas de calidad y construcción que implica la seguridad, estabilidad estructural y factibilidad, ya que con esto se desea disminuir la sobre explotación de materiales pétreos, erosión de suelos y la contaminación que se produce al extraerlos.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 7.

Flujograma de procesos a efectuar centrado en la selección multicriterio.



SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

5.1 Selección de materiales CES Edupack nivel 3 (Eco desing)

En el estudio es necesario la implementación del software CES Edupack 2019 con su módulo Eco desing nivel 3 por la implementación de fibras naturales en el diseño columna como si muestra en la figura 8, donde propiedades como el costo, módulo de young, limite elástico y resistencia a la tracción son escogidos debido a que en estas propiedades no se detallan en investigaciones anteriormente mencionadas.

Figura 8

Selección de nivel Eco Design.



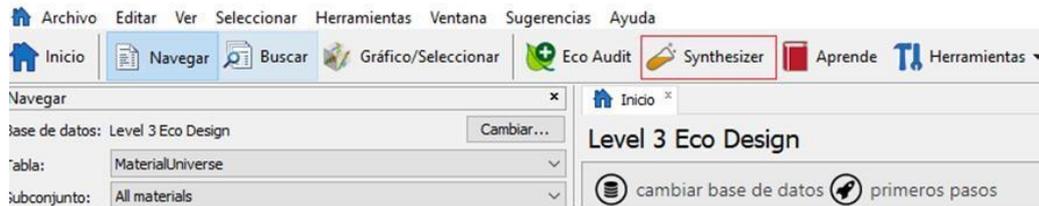
Fuente : (CESduPack, 2019).

Dentro de este software existe una herramienta llamada Synthesizer como se muestra en la figura 9, la cual permite predecir el comportamiento de materiales reforzados como el concreto con fibras naturales y fibras sintéticas

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 9

Módulo de materiales compuestos Synthesizer.



Fuente: (EduPack, 2019).

Se establece el modelo como se muestra en la figura 10, utilizando la opción de fibra continua donde permite obtener los resultados faltantes como lo es el módulo cortante y el precio requerido en este estudio que se muestran en la tabla 2.

Figura 10

Modelo para fibra continua.



Fuente : (EduPack, 2019)

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Dentro de esta herramienta se da las opciones para poder identificar la matriz que es el concreto y la fibra natural que en este caso es de banano, pambil, ceniza de cascarilla de arroz y fibra de plástico, teniendo una distribución uniforme tomando en cuenta la fracción volumétrica empleada en la mezcla como se muestra en la figura 11 donde se predice el comportamiento del material reforzado.

Figura 11

Compuesto para fibra continua.

Fibra continua (UD y QI) ?

Predice el comportamiento de materiales reforzados con fibras continuas

Unidireccional = fibras alineadas [0°]
Cuasi isotropo = fibras en disposición multiaxial [0° / +45° / -45° / 90°]

Suposiciones:

- Distribución uniforme del refuerzo
- Unión perfecta entre matriz y fibra
- El material es totalmente denso

Orientación de la fibra

Unidireccional

Registros utilizados

Matriz

Fibra

Variables del modelo

Introduce valores o rango de valores. Por ejemplo, 1; 3; 8 o 1-8

Fracción volumétrica de fibra % Número de valores:

Nomenclatura de los registros

Matriz *

Fuente : (EduPack, 2019)

Por otra parte, para simular la fibra de pambil en el software ya mencionado y obtener características mecánicas como el módulo de young, limite elástico, costo y resistencia a la tracción se tomó en consideración la palma palmyrah ya que esta pertenece a la

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

misma familia arecaceae del pambil y el mismo orden de las arecales. Teniendo en consideración similitudes en su estructura (Navarro, 2013).

La tabla 2 muestra el porcentaje de fibra y fracción volumétrica implementada en probetas cilíndricas de concreto especificadas por la norma A.S.T.M. C-39 (NTE INEN 1573:2010 1R).

Tabla 2

Fracción volumétrica de fibras.

Elemento	Porcentaje de fibra %	Fracción volumétrica
Ceniza de cascarilla de arroz	5	1325 cm^3
Fibra de Pambil	2.5	132.52 cm^3
Fibra de Banano	1	53.01 cm^3
Fibra de Plástico reciclado	25	1325 cm^3

Fuente : (Camargo e Higuera, 2017), (Alvarado, 2014), de (Tualombo, 2015),

(Piñeros & Herrera, 2018).

5.2 Evaluar y seleccionar el material adecuado

Para el presente estudio se evaluarán los 4 materiales ecológicos que serán implementados en la columna los cuales están descritos en el capítulo anterior, como se indica en la tabla 3, para eso se tomó en cuenta propiedades como densidad, Módulo de Young, la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, módulo de ruptura, resistencia a la tracción y costo.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 3

Propiedades de los materiales ecológicos con hormigón.

Variables	
Propiedades	Características
Físicas	Densidad (Kg/m ³)
	Porcentaje de fibra añadida (%)
	Módulo de Young (GPa)
	Resistencia a la compresión (MPa)
	Resistencia a la flexión (MPa)
Mecánicas	Módulo de Ruptura (MPa)
	Resistencia a la tracción (MPa)
	Costo USD/kg
Ecológicas	Reciclabilidad
	Biodegradabilidad

5.3 Definir las variables del material a ser evaluadas

El objetivo de esta etapa es definir las variables de los componentes que conformarán la columna como se muestra en la tabla 4, se tomaron en cuenta las propiedades mecánicas y físicas utilizadas en estos estudios realizados por diferentes autores. Las cuáles serán implementadas en la realización de los métodos multicriterio con lo cual se podrá escoger a material idóneo que será aplicado al concreto para la creación de una columna.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 4

Propiedades de las fibras con concreto.

Material	Fibra añadida (%)	Densidad (Kg/m ³)	R. compresión (MPa)	Reflexión (MPa)	R. tracción (MPa)
Ceniza Cascarilla de arroz	5	3090	31.2	4.69	3.48
Fibra de Pambil	2.5	2283	21.93	3.49	3.10
Fibra de Banano	1	1730	5.32	1.72	10
Fibra de platico reciclado	25	1790	5.19	3.60	-

Fuente : (Demera y Romero, 2018), (Pérez y Higuera , 2017), (Gautam, Batra, y Singh, 2019), (Baquerizo Perez y Lazo Palomino, 2019), (Tualombo, 2015), (Piñeros & Herrera, 2018), (Mora Chacón, 2016), (Alvarado, 2014), (Caizaguango y Terán, 2020), (Infante y Valderram, 2019).

Una vez obtenidas las propiedades mecánicas de las diferentes fibras añadidas al concreto por medio de la herramienta synthesizer del software CES EduPack e investigaciones bibliográficas se complementan los criterios mostrados en la tabla 5 los cuales serán utilizados para el desarrollo de selección por medio de los métodos multicriterio (MCDM).

- F1. Ceniza de carilla de arroz.
- F2. Fibra de Pambil.
- F3. Fibra de Banano.
- F4. Fibra de platico reciclado.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 5

Propiedades de las fibras con concreto y synthesizer.

Variables		Propiedades			
Propiedades	Características	F1	F2	F3	F4
Físicas	Densidad (Kg/m ³)	1890	2283	1730	1790
	Módulo de Young (GPa)	15.6	14.7	16.4	48.8
	Resistencia a la compresión (MPa)	31.2	21.93	5.32	5.19
Mecánicas	Resistencia a la flexión (MPa)	4.69	3.49	1.72	3.60
	Limite elástico (MPa)	1.03	1.7	1.13	7.97
	Resistencia a la tracción (MPa)	3.48	3.10	10	651
Costos	Costo USD/kg	0.52	0.08	0.06	17.3
	Reciclabilidad	si	si	si	no
Ecológicas	Biodegradabilidad	si	si	si	no
	Embodied energy (MJ/kg)	2.91	1.12	0.94	52
	Footprint (kg/kg)	0.251	0.147	0.139	2.53

Fuente : (Pérez y Higuera , 2017), (Gautam, Batra, y Singh, 2019), (Baquerizo Perez y Lazo Palomino, 2019), (Tualombo, 2015), (Piñeros & Herrera, 2018), (Mora Chacón, 2016), (Valer, 2014) , (Alvarado, 2014), (Caizaguango y Terán, 2020), (EduPack, 2019).

Se codifica los criterios de cada uno de los materiales mediante letras para mayor facilidad del cálculo de los métodos multicriterio.

- Donde A es el costo del material.
- B es la densidad
- C es el módulo de Young

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- D es la resistencia a la tracción
- E es el límite a la elasticidad
- F es la resistencia a la flexión
- G es la resistencia a la compresión
- H es embodied energy
- I es CO2 footprint

5.4 Seleccionar el método multicriterio

Para la toma de decisiones existen varios tipos de métodos multicriterio, los cuales varían en su procedimiento y estudio, aunque la conexión a una solución numérica se establece en la generalidad de los casos (Salazar-Loor et al., 2019).

5.4.1 Método de Entropía.

Este método se basa en la Mecánica Estadística y la teoría de la información la cual se relaciona con la incertidumbre que se da en los ensayos de nuevos materiales. De tal manera se logra mostrar la cantidad de información que se obtiene del experimento.

Al tener varios materiales no se puede predecir con precisión los valores que se va a tener debido a la aleatoriedad que se presenta en sus resultados, es por ello que la entropía se encarga de medir esa aleatoriedad (Estrada García, 2002).

También se detalla (Estrada García, 2002) que para determinar la cantidad de la información donde esta debe ser continua y todos los elementos de la señal deben ser equiprobables al aparecer.

La medición de la información debe tener continuidad y los resultados posibles son igualmente probables para esto se define los siguientes pasos.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Definir la matriz de decisión.

$$X = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} \end{bmatrix}$$

- Cálculo de la matriz de decisión normalizada para identificar los valores sin mediciones de diferentes valores.

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (1)$$

- Cálculo de entropía mediante los valores de la matriz normalizada.

$$k = \frac{1}{\ln m} \quad (2)$$

$$E_j = -k \left(\sum_{i=1}^m P_{ij} \ln(P_{ij}) \right) \quad (3)$$

- Cálculo de la diversidad de criterio.

$$D_j = 1 - E_j \quad (4)$$

- Cálculo del peso normalizado de cada criterio escogido.

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{i=1}^m D_j} \quad (5)$$

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

5.4.2 Método Desviación Estándar

Este método estadístico consiste en la identificación de variaciones de un sistema, evaluando la disociación de valores conforme a un punto central siguiendo los siguientes pasos (Jahan et al., 2012).

- Definición de la matriz de decisión. Para lo cual se implementa la misma matriz usada en el método de entropía.
- Cálculo de la desviación estándar por medio de la ecuación (6). Donde x_{ij} se determinan como valores de la matriz de decisión, m es el número de materiales, σ_j de termina los valores de desviación estándar y \bar{x} son valores de la sumatoria de criterios divididos entre m .

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x})^2}{m}} \quad (6)$$

- Determinar pesos para cada criterio por medio de la ecuación (7). Donde W_j es el peso de cada criterio y $\sum_{j=1}^n \sigma_j$ es la sumatoria de los valores en la desviación estándar.

$$W_j = \frac{\sigma_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j} \quad (7)$$

5.4.3 Método AHP

Este método estructurado permite determinar criterios cuantitativos y cualitativos que intervienen en la toma de decisiones por medio del análisis de sensibilidad de los criterios por medio de los siguientes pasos (Taherdoost y Group, 2017).

- Definir número de comparaciones mediante la ecuación (8).

$$C_p = \frac{n(n-1)}{2} \quad (8)$$

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Determinar las ponderaciones en base al método de comparación desarrollando la matriz comparando criterios como se muestra en la tabla 6

Tabla 6

Ponderación de los criterios.

Valor	Definición
1	Igual importancia
3	Importancia moderada uno sobre otro
5	Gran importancia
7	Muy fuerte importancia
9	Extrema importancia
2,4,6,8	Son valores intermedios

Fuente : (Odu, 2019)

- Construir matriz de selección de pesos.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & r_{12} \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1} & r_{n2} & 1 \end{pmatrix}$$

- Construir matriz normalizada.

$$X = \begin{pmatrix} 1/v_1 & r_{12}/v_2 \dots & a_{1n}/v_n \\ a_{21}/v_1 & 1/v_2 \dots & a_{2n}/v_n \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{n1}/v_1 & r_{n2}/v_2 & 1/v_n \end{pmatrix}$$

- Determinar el promedio de la matriz normalizada dado que este será el peso de cada criterio.
- Determinación índice de consistencia por medio de la ecuación (9). Donde λ_{max} se obtiene de la multiplicación de pesos y la ponderación y se emplea el valor máximo.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

- De acuerdo a (Saaty, 1980) el índice aleatorio para 9 criterios es de 1.45, con lo cual se puede calcular la tasa de consistencia como se representa en la ecuación (10). Donde RI es el índice aleatorio.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

Se debe tomar en cuenta la consistencia de análisis de sensibilidad (CR), si la relación de consistencia es inferior a 0.1 es indica un nivel razonable, por lo contrario, al ser mayor que 0.1 existe una inconsistencia en el proceso (Odu, 2019).

- La tasa de consistencia es CR, RI, no es un resultado es un factor dado que debe expresarse en metodología. CR debe presentarse y ser menor 0.10 y expresar porque este resultado es correcto.

5.4.4 Método VIKOR

El concepto básico del método VIKOR define las soluciones por separado donde los resultados positivos tiene un resultado de 100 y los valores negativos un valor de 0 (Martínez Gómez et al., 2018).

- Definir el mejor valor y peor valor mediante las características para obtener un valor beneficioso o no beneficioso (11) y (12). Donde f_j^{max} es el mejor valor de los criterios y f_j^{min} es el peor valor de los criterios escogidos.

$$f_j^{max} = \max f_{ij} \quad (11)$$

$$f_j^{min} = \min f_{ij} \quad (12)$$

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Cálculo de las soluciones óptimas como se representa en las ecuaciones (13) y (14), donde U_i es la matriz resultante de la sumatoria y R_i es la matriz de los valores que corresponden a los rangos, wf valores de los pesos.

$$U_i = \sum_{j=1}^n \frac{wf(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \quad (13)$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{wf(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \right] \quad (14)$$

- Calcular valores V_i por la relación, mediante la aplicación de la ecuación (15).

$$Q_i = \frac{\alpha (U_i - U_{min})}{(U_{max} - U_{min})} + \frac{(1-\alpha)(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \quad (15)$$

Donde la constante de correlación se representa con α y se emplea el valor de 0.5 determinando así los valores máximos y mínimos los cuales son indicadores de medición en las ecuaciones 13, 14 y 15, V_i muestran la agrupación de soluciones obtenidas, ya que estas se ordenan de mayor a menor.

5.4.5 Estabilidad Aceptable y ventaja aceptable VIKOR.

Dentro de esta etapa del estudio se debe determinar las soluciones de compromiso A1 ya que esta es la mejor ponderada en función del valor de Q en condición de ventaja aceptable como se muestra en la ecuación 16.

$$Q(A^{(2)}) - Q(A^{(1)}) \geq DQ \quad (16)$$

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Donde $A^{(1)}$ se define como la primera alternativa mejor ponderada teniendo en cuenta la clasificación de valores Q , $A^{(2)}$ se define como la segunda alternativa según Q . El valor DQ se da por medio de la ecuación 17 donde j es el número de materiales a evaluar (Muñoz Medina & Romana García, 2016).

$$DQ = \frac{1}{j-1} \quad (17)$$

Por otra parte, la estabilidad aceptable menciona que la alternativa $A^{(1)}$ debe tener el mejor valor en el criterio U_i y/o R_i ya que esto determinara que existe una solución de compromiso aceptable dentro del proceso de evaluación (Muñoz Medina & Romana García, 2016).

5.4.6 Método COPRAS

Este método se basa en determinar y evaluar las mejores alternativas de decisión que nos guíen a las decisiones ideales y las peores-ideales enfocándose en la importancia y grado de utilidad (Martínez Gómez et al., 2018).

Este método define un algoritmo que se muestra en los siguientes pasos:

- Construcción de la matriz de decisión normalizada como se muestra en la ecuación (18).

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (18)$$

Donde a_{ij} es el valor de cada criterio, r_{ij} es la matriz de decisión normalizada y

$\sum_{i=1}^m a_{ij}$ es la sumatoria de los valores de cada uno de los criterios.

- Elaboración de matriz estandarizada de pesos.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

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

- Determinación de valores de peso normalizada valores beneficiosos y no beneficiosos como se representa en la ecuación (19) y (20). Donde V_{+ij} representa el valor para un criterio beneficios, S_{+i} representa la suma de los valores V_{+ij} . Para los valores no beneficiosos corresponde V_{-ij} y S_{-i} representa la suma de valores de V_{-ij} .

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^m v_{+ij} \quad (19)$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^m v_{-ij} \quad (20)$$

- Para el cálculo de la prioridad relativa de las alternativas se emplea la ecuación (21). Donde Q_i representa la prioridad relativa, S_{+i} es el peso normalizado positivo, S_{-i} es el peso normalizado negativo.

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}}} \quad (21)$$

- Cálculo de índice de rendimiento de cada criterio donde se busca un grado de satisfacción mediante la ecuación (22). Donde U_i corresponde a la agrupación de soluciones ordenadas de mayor a menor.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} * 100 \quad (22)$$

5.4.7 Método TOPSIS

El método TOPSIS elige alternativas con valor ideal el cual tiene criterios beneficiosos y anti-deal en la cual se minimiza los criterios, son respuestas artificiales las cuales demuestran posición de cada estimación a la que se pretende llegar y valorar (Pérez Domínguez et al., 2017).

Este sistema define un algoritmo que se delimita en los siguientes pasos:

- Construir matriz de decisión normalizada como se muestra en la ecuación (23) y (24) las cuales muestran la maximización y minimización de los criterios escogidos para este estudio. Donde a_{ij} representa los valores de la matriz de decisión, r_{ij} representa la matriz normalizada.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (23)$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (24)$$

- Elaboración de matriz estandarizada de pesos, como se muestra en la ecuación (25). Donde w_n es el peso de cada uno de los criterios, V_{ij} representa la matriz estandarizada de pesos y v_{ij} determina el valor de cada componente particular.

$$v_{ij} = w_n r_{mn} \quad (25)$$

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

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

- Delimitar las soluciones positivas y negativas ideales. Donde A^* y A^- son los valores positivos y negativos, mediante la ecuación (26) y (27).

$$A^* = \{\max v_{ij} | j \in J, (\min i v_{ij} | j \in J')\} = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \quad (26)$$

$$A^- = \{\max v_{ij} | j \in J, (\min i v_{ij} | j \in J')\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \quad (27)$$

- Calcular la diferencia de mediciones que existen entre las alternativas plateadas. Mediante la ecuación (28) y (29). Donde S_i^* y S_i^- representan las divisiones positivas y negativas para la solución.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (28)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (29)$$

- Calcular la proximidad que existe a la solución ideal como se muestra en la ecuación (30). Donde C_i^* se emplea como el coeficiente de proximidad relativo.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (30)$$

- Fijar los niveles de las preferencias para seleccionar la mejor opción ya que el valor ideal ocupará la primera posición.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

5.4.8 Coeficiente de SPEARMAN

Para esta etapa del estudio se agrupa los resultados obtenidos por medio de la evaluación de los métodos multicriterio donde se agruparán en parejas con el objetivo de que se combinen mutuamente. La ecuación (31) muestra el coeficiente de ración Spearman.

$$R_s = 1 - \frac{6 \sum_y^x d^2}{n(n^2 - 1)} \quad (31)$$

Donde:

R_s = Coeficiente de correlación de Spearman.

$\sum_y^x d^2$ = Suma de diferencias entre factores X y Y

n = Cantidad de variables.

El coeficiente SPEARMAN permite medir el grado de asociación entre las variables cuantitativas que existan como se muestra en la tabla 7 , para ella se emplea la tabla de relación la cual toma valores desde -1.0 hasta +1.0 indicando la asociación entre los valores (Mondragón, 2014).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 7

Correlación en función del rango.

Rango	Relación
-0.91 a - 1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.31 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.30	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0.00	No existe correlación
+0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.30	Correlación positiva media
+0.31 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a + 1.00	Correlación positiva perfecta

Funete: (Mondragón, 2014)

5.5 Elaboración de prototipo virtual de la columna

Para la elaboración del prototipo de columna se utilizará las especificaciones de la norma NEC la cual indica que debe tener dimensiones de 500 mm x 500 mm de su base y un total de entrepiso máximo de 2500 mm en todos los pisos. Mientras que los materiales de refuerzo como las barrillas de acero aportan resistencia y seguridad con una cantidad de 8 varillas por elemento estructural con un diámetro de 20 mm como se muestra en la figura 12 (NEC SE Vivienda, 2015).

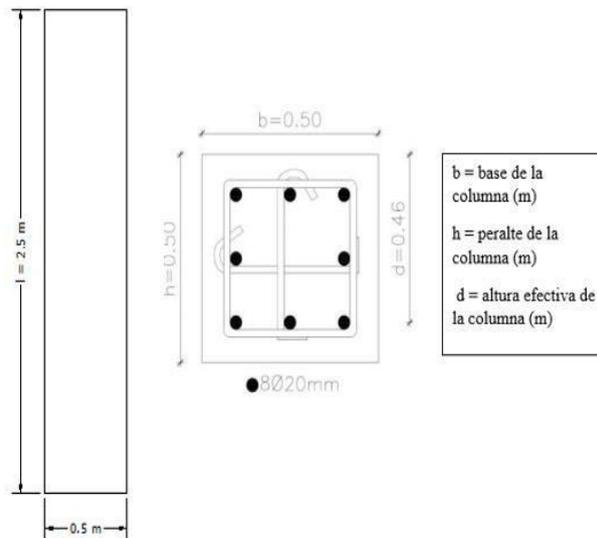
Por otra parte, para la creación del modelo geométrico de la columna de hormigón se utilizó el programa ANSYS con licencia estudiantil, donde se escogió el programa por

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

el conocimiento previo para la creación de modelos digitales en 3D y su amplia biblioteca de materiales de ANSYS.

Figura 12

Prototipo virtual de la columna.



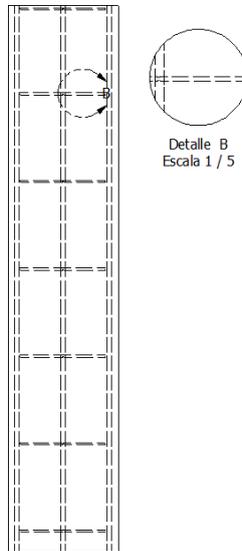
Fuente : (NEC SE Vivienda, 2015).

Las fibras se adicionarán al hormigón de forma vertical ya que estas deben constituir refuerzo a la estructura y su distribución en el interior de la mezcla de hormigón es dispersa, tridimensional y aleatoria como se muestra en la figura 13.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 13

Detalle de fibras en la columna.



5.6 Desarrollar un mallado estructurado para la columna

El mallado que se va a utilizar y definir es un mallado acorde a los requerimientos que se necesite donde las fuerzas asignadas a la columna corresponden a los cargas vivas y muertas que interactúan en la estructura ya que se debe tomar en cuenta el punto crítico donde interactúan los pesos de los elementos y se realizará en esa región un mallado más fino para obtener mejores resultados. Una vez acabada la simulación en ANSYS versión estudiante obtendrá los resultados donde se podrá apreciar mediante el rango de esfuerzos al que está sometido la estructura por efecto de las cargas que soporta esto se muestra por medio de rango de colores. Para realizar este análisis se realiza el siguiente procedimiento (Chen & Liu, 2014).

- Se divide el modelo CAD en piezas para generar una malla (Discretización)
- Describir el comportamiento de las cantidades físicas que existe en el elemento.
- Conectar los elementos en nodos con el objetivo de formar un sistema de ecuaciones en el modelo.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Aplicar las condiciones de contorno o borde para necesarias al modelo mecánico.
- Configuraciones donde se define propiedades de elemento y aplicar cargas teniendo en cuenta las limitaciones del diseño.
- Solucionador donde se resuelve el sistema de ecuaciones planteado con las condiciones de borde.
- El postprocesamiento se da por último para ordenar y mostrar resultados.

La tabla 8 muestra las condiciones que se dio al mallado estos valores se especifican debido a que al tener varias fibras en la geometría de la columna se puede crear errores al momento debido a que son elementos muy pequeños y al tener un tamaño del elemento reducido produce errores al momento de que le programa resuelve la geometría con la carga y restricciones insertas en el modelo. La configuración de convergencia se muestra en la tabla 8 las cuales contienen las características para obtener la simulación de la columna de hormigón en el programa ANSYS Student.

Tabla 8

Características del mallado.

Configuración de malla
Características
Tamaño medio del elemento
Tamaño mínimo del elemento
Factor de modificación
Angulo máximo de giro

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Con esta configuración de malla se tiene como resultado 78023 nodos y 17514 elementos debido a que con este número de nodos y elementos permite obtener adecuados resultados.

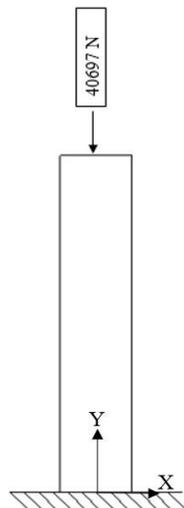
5.7 Establecer condiciones de borde

- Determinar configuraciones estructurales de acuerdo a las normas NEC.
- Determinar la carga a la que va estar sometida la columna.
- Insertar parámetros de materiales ecológicos, materiales pétreos y geometrías de la columna en el software ANSYS versión estudiantil.
- Simular esfuerzos- deformación para realizar una comparación de la columna de hormigón convencional y la columna de hormigón compuesta por el material ecológico ganador.

El estudio de (B. Cueva, 2020) determina que la carga de 40697 N es la más crítica con la cual se debe simular ya que esto permite evaluar el comportamiento de la columna, aplicando la carga en la cara contraria a las restricciones como se detalla en la figura 14.

Figura 14

Condición de carga.



SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Verificar factor de seguridad el cual se enfoca en la carga permisible contra la carga de pérdida de función en un determinado diseño donde el factor de seguridad para estructuras debe ser mayor a 1, este controla que los esfuerzos creados por las cargas en la estructura no superen el límite elástico del material, evitando una ruptura del diseño (Budynas & Keith, 2001).
- El desplazamiento es una condición que se debe tomar en cuenta al actuar fuerzas sobre la estructura donde se corresponde a la deformación total en relación a la deformación (Budynas & Keith, 2001).
- Se tiene que verificar el esfuerzo de VonMises el cual es la energía de deformación donde se predice la falla del elemento respecto a la resistencia a la fluencia (Budynas & Keith, 2001).

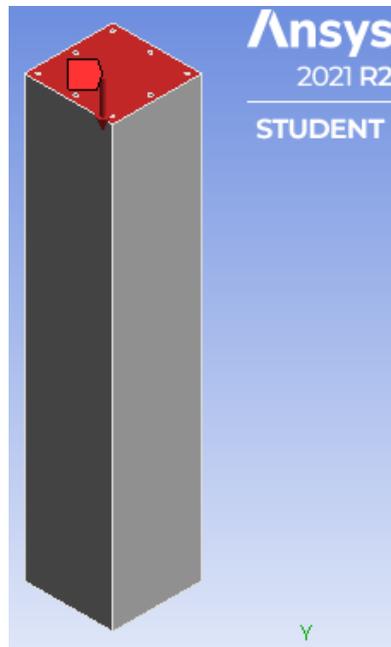
5.8 Simulación del prototipo de columna

En esta parte del estudio se implementa la simulación para verificar el resultado ganador obtenido por medio de la implantación de los métodos multicriterio para esto se generan dos prototipos de columna donde se define las restricciones de los elementos y cargas. Para esto se definen dos tipos de sólidos debido a que el primero estará compuesto de hormigón con varillas de acero y el segundo compuesto de hormigón, varillas y se añade las fibras del material ganador como se muestra en la figura 15.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 15

Carga aplicada en la columna de hormigón.



Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

También muestra la aplicación de la carga, donde para este caso de estudio se aplicará una fuerza de compresión definida en estudios previos de 4.15 toneladas (40697 Newtons) siendo así la carga más crítica que debe soporta la columna.

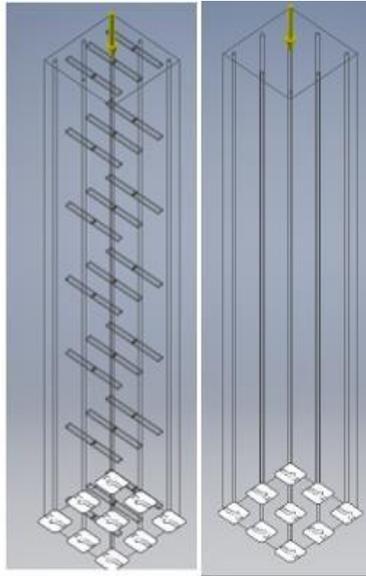
5.9 Verificar los resultados obtenidos

La simulación de la columna se realizará en dos etapas. La primera etapa consistirá en simular una columna establecida por la norma NEC en referencia a sus dimensiones y materiales convencionales como se muestra en la figura 16. La segunda etapa se lleva a cabo en incorporar en el prototipo de la columna el material ecológico seleccionado como se muestra en la figura esto servirá con la finalidad de tener un mecanismo de comparación de resultados.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 16

Simulación columna de concreto con fibras incorporadas y sin fibras incorporadas.



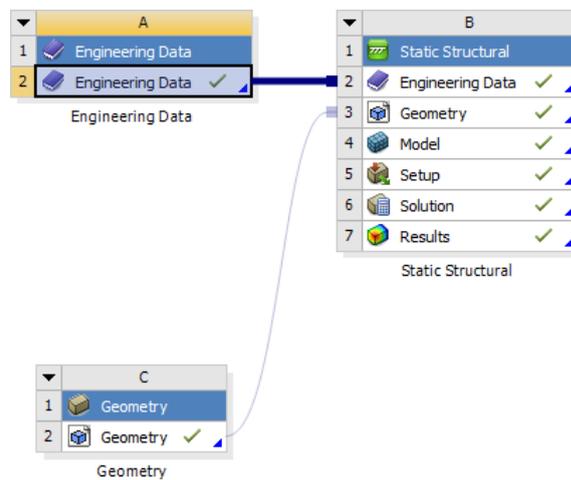
Fuente: (Ansys Stusent, 2021).

En el estudio es necesario la implementación del software ANSYS Student con su módulo de creación de nuevos materiales debido a que esta investigación implementa fibras naturales en el concreto y sus características tanto físicas como mecánicas no se encuentra en la librería de ANSYS implantando Engineering Data en la geometría del elemento. Al crear nuevo componente es necesario proporciona información sobre las características del nuevo material que será utilizado en la simulación. La figura 17 muestra el navegador de materiales en el cual se suministrará el material y aspectos que requiera para un análisis más coherente y una mejora de calidad en los resultados que se tendrá.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 17

Workbench de ANSYS.



Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

Dentro del Engineering Data como se muestra en la figura 18, se despliega el módulo de editor de material en el cual se nombra el nuevo componente y se proporciona las características mecánicas y físicas necesarias para la simulación.

Figura 18

Módulo de edición de material

The screenshot shows the 'Contents of Engineering Data' table with a new material 'concreto y silica' added. Below it, the 'Properties of Outline Row 3: concreto y silica' table is displayed, listing various material properties and their values.

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	1890	kg m ⁻³
Isotropic Elasticity		
Derive from	Youn...	
Young's Modulus	15600	MPa
Poisson's Ratio	0,104	
Bulk Modulus	6,5657E+09	Pa
Shear Modulus	7,0652E+09	Pa
Tensile Yield Strength	3,48	MPa
Compressive Yield Strength	31,2	MPa

Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

6. Análisis y Presentación de resultados

6.1 Resultados Obtenidos en CES Edupack nivel 3 (Eco desing)

Luego de obtener características mecánicas de las fibras mencionadas en este estudio mediante una base bibliográfica mencionadas en el apartado 4.4, estos se complementan con la utilización de la herramienta la herramienta synthesizer ya que se determina únicamente propiedades específicas como sin el módulo de Young, limite elástico, costo y resistencia a la tracción como se muestra en la tabla 9.

Tabla 9

Propiedades de las fibras con concreto con la herramienta synthesizer de CES EduPack.

Material	Módulo de Young (GPa)	Limite elástico (MPa)	Costo USD/kg	R. Tracción (MPa)	Embodied energy	Embodied energy
Ceniza de arroz	15.6	1.03	0.52		2.91	0.251
Fibra de Pambil	14.7	1.7	0.8	-	1.12	0.147
Fibra de Banano	16.4	1.13	0.07	-	0.94	0.139
Fibra de platico reciclado	38.8	7.97	17.3	626	62.3	3.03

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Fuente : (EduPack, 2019)

6.2 Aplicación de métodos multicriterio por ponderación de pesos

Para el desarrollo de los métodos multicriterio se empleó los métodos de ponderación entropía, desviación estándar y AHP.

6.2.1 Método de entropía

Como resultado del método de entropía se agrupa las fibras y propiedades como se muestra en la tabla 10, con lo cual se realiza el cálculo de ponderación de pesos.

Tabla 10

Matriz de fibras y propiedades.

Material	Costo	Densidad	Módulo de Young	Resistencia a la tracción	Limite elástico	Resistencia a la flexión	Resistencia a la compresión	Embodied energy	Huella de Carbono
(F)	(C1)	(C2)	(C3)	(C4)	(C5)	(C6)	(C7)	(C8)	(C9)
F1	0,52	3090	15.6	3,48	1.03	4,69	31,2	2.91	0.251
F2	0,8	2283	14,7	3,1	1,7	3,49	21,93	1.12	0.147
F3	0,07	1730	16,4	10	1,13	1,72	5,32	0.94	0.139
F4	17,3	1790	38.8	651	7,97	3,6	5,19	62.25	3.03

Dentro de la matriz los materiales se codificaron con la letra F con un número que lo define a cada uno para mayor comprensión. A continuación, se presenta los cálculos realizados para el método de entropía.

➤ Matriz de decisión

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

$$X = \begin{bmatrix} 0.52 & 3090 & 15.6 & 3,48 & 1,03 & 4,69 & 31,2 & 2,91 & 0,251 \\ 0.8 & 2283 & 14,7 & 3,1 & 1,7 & 3,49 & 21,93 & 1,12 & 0,147 \\ 0.07 & 1730 & 16,4 & 10 & 1,13 & 1,72 & 5,32 & 0,72 & 0,139 \\ 17.3 & 1790 & 38.8 & 651 & 7,97 & 3,6 & 5,19 & 52 & 3,03 \end{bmatrix}$$

- Normalización de matriz de decisión

A fin de normalizar la matriz se emplea la ecuación (1) con la utilización de los valores de la matriz de decisión para el cálculo de la matriz P_{ij} .

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} 0,028 & 0,347 & 0,182 & 0,005 & 0,087 & 0,347 & 0,520 & 0,043 & 0,070 \\ 0,043 & 0,257 & 0,172 & 0,005 & 0,144 & 0,259 & 0,324 & 0,017 & 0,041 \\ 0,004 & 0,195 & 0,192 & 0,015 & 0,096 & 0,127 & 0,079 & 0,014 & 0,039 \\ 0,926 & 0,201 & 0,454 & 0,975 & 0,674 & 0,267 & 0,077 & 0,926 & 0,849 \end{bmatrix}$$

- La tabla 11 muestra el cálculo de entropía, mediante el empleo de la ecuación 2.

Tabla 11

Resultados del cálculo de entropía.

Entropía	Resultado
E1	0,149
E2	0,618
E3	0,586
E4	0,064
E5	0,496
E6	0,606
E7	0,502
E8	0,152
E9	0,265

- La obtención de pesos que se muestra en la tabla 12, se da promedio de la aplicación de la ecuación 3, el valor de W determina el peso de cada criterio.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 12

Pesos obtenidos del método Entropia.

Pesos	Resultado
w1	0,153
w2	0,068
w3	0,074
w4	0,167
w5	0,099
w6	0,070
w7	0,089
w8	0,151
w9	0,131

Como se puede apreciar en la tabla 13 el valor de w4 es el más importante siendo este la resistencia a la tracción, seguido por w1 que representa el precio y w2 que representa a embodied energy. Estos valores son las tres principales características mecánicas que tienen más ponderación en los resultados del método de Entropia.

Por otra parte, al obtener el resultado de los pesos de cada criterio donde la mejor valoración es para resistencia a la tracción seguido por precio y embodied energy, no se da una prioridad a la resistencia a la compresión dando como resultado un sexto lugar de importancia, la resistencia a la flexión da un resultado de octavo lugar de importancia. Debido a que la columna está sometida a una carga axial su principal trabajo es soportar una carga de compresión y flexión (Caiza Sánchez & Viera Arroba,

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

2019). Al tener criterios ganadores insuficientes se debe realizar otros métodos de ponderación de pesos.

6.2.2 Método de desviación estándar

Este estadístico identifica de variaciones del sistema, evaluando la disociación de valores conforme a un punto central, teniendo en cuenta las características de cada uno de los materiales. Con este método se obtiene un resultado de prioridad y como se lo aplicara.

- Se emplea la matriz de decisión utilizada en el método de entropía
- La tabla 13 muestra el resultado del cálculo de la desviación estándar (σ_j) utilizando la ecuación 6.

Tabla 13

Resultados del cálculo de desviación estándar.

D. Estándar	Resultado
σ_1	7,398
σ_2	544,478
σ_3	10,474
σ_4	279,512
σ_5	2,905
σ_6	1,064
σ_7	11,494
σ_8	26,271
σ_9	1,235

- La tabla 14 muestra el resultado de los valores de los pesos de cada criterio, empleando la ecuación 7.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 14

Pesos obtenidos del método desviación estándar.

Pesos	Resultado
w1	0,008
w2	0,616
w3	0,011
w4	0,316
w5	0,003
w6	0,001
w7	0,013
w8	0,030
w9	0,001

Como resultado se muestra la tabla 14 dando como prioridad a w2 que es la densidad seguido de w4 que es la resistencia a la tracción y el tercer valor es w8 que representa a embodied energy. Estos resultados son las 3 principales prioridades que señala el método.

Los resultados obtenidos por medio del método de desviación estándar tales como la densidad, resistencia a la tracción y embodied energy no son apropiados para ser empelados en los métodos multicriterio puesto que estas propiedades son notables al trabajar columna a compresión a consecuencia de cargas axiales (Caiza Sánchez & Viera Arroba, 2019). En este sentido se evalúa por otro método que se adapte a las necesidades del estudio.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

6.2.3 Método AHP

Por medio del método AHP se obtiene las prioridades mediante las características de cada material, esto permite determinar criterios cuantitativos y cualitativos que intervienen en la toma de decisiones por medio del análisis de sensibilidad.

- Se emplea la matriz de decisión utilizada en el método de entropía con método de jerarquía de criterios como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15

Matriz de decisión del método AHP.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
F1	0,52	3090	15,6	3,48	1,03	4,69	31,2	2,91	0,251
F2	0,8	2283	14,7	3,1	1,7	3,49	21,93	1,12	0,147
F3	0,07	1730	16,4	10	1,13	1,72	5,32	0,72	0,139
F4	17,3	1790	38,8	651	7,97	3,6	5,19	52	3,03

- Cálculo de matriz normalizada como se muestra en la tabla 16.

Tabla 16

Matriz por selección de pesos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	1,0	1,0	1,0	0,3	0,3	1,0	0,3	3,0	1,0
B	1,0	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3	1,0	0,3
C	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
D	3,0	3,0	1,0	1,0	1,0	3,0	0,2	1,0	3,0
E	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	3,0	0,3	1,0	1,0
F	1,0	1,0	1,0	0,3	0,3	1,0	0,3	1,0	0,3
G	3,0	3,0	1,0	5,0	3,0	3,0	1,0	1,0	3,0
H	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
I	1,0	3,0	1,0	0,3	1,0	3,0	0,3	1,0	1,0

- Resultado de matriz normalizada como se muestra en la tabla 17.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 17

Resultado de Matriz normalizada.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
A	0,07	0,07	0,11	0,03	0,03	0,06	0,07	0,27	0,09
B	0,07	0,07	0,11	0,03	0,10	0,06	0,07	0,09	0,03
C	0,07	0,07	0,11	0,10	0,10	0,06	0,21	0,09	0,09
D	0,21	0,20	0,11	0,10	0,10	0,18	0,04	0,09	0,26
E	0,21	0,07	0,11	0,10	0,10	0,18	0,07	0,09	0,09
F	0,07	0,07	0,11	0,03	0,03	0,06	0,07	0,09	0,03
G	0,21	0,20	0,11	0,48	0,31	0,18	0,21	0,09	0,26
H	0,02	0,07	0,11	0,10	0,10	0,06	0,21	0,09	0,09
I	0,07	0,20	0,11	0,03	0,10	0,18	0,07	0,09	0,09

- Pesos obtenidos del método AHP como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18

Pesos obtenidos del método AHP.

Pesos	Resultado
w1	0,088894
w2	0,070005
w3	0,098744
w4	0,142917
w5	0,112099
w6	0,062343
w7	0,227181
w8	0,093576
w9	0,104241

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Como resultado se muestra la tabla 19 dando como prioridad a w_7 que es la resistencia a la compresión, seguido de w_4 que es la resistencia a la tracción y el tercer valor es w_5 que representa a el límite elástico. Estos resultados son las 3 principales prioridades que señala el método.

Al tener como criterio principal la resistencia a la compresión a la que está sometida la columna a consecuencia de la carga axial su principal trabajo es soportar una carga de compresión este criterio es importante al momento de evaluar el rendimiento de una columna al transmitir las cargas de pisos superiores al suelo por medio de los cimientos.

Por otra parte, la resistencia a la tracción y límite elástico son importantes al determinar el comportamiento de la columna en un comportamiento de falla dúctil (Caiza Sánchez & Viera Arroba, 2019).

También el cuarto criterio es la huella de carbono ya que se desea minimiza el impacto ambiental causa un incremento en el uso de materiales pétreos y esto a su vez conlleva una repercusión en el medio ambiente como consecuencia de la erosión de los suelos provocada por su extracción y el CO₂ que produce la maquinaria que extrae los materiales (Romero et al., 2016).

La relación de consistencia se da por la multiplicación de la matriz por selección de pesos por los pesos obtenidos de cada criterio esto se muestra mediante la mediante la tabla 20.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 19

Matriz de relación de consistencia.

Relación de consistencia A x P	
0,865	9,738
0,683	9,767
1	10,127
1,469	10,28
1,151	9,769
0,609	9,769
2,446	10,77
1.151	10,267
1,017	9,765

Por medio del promedio de la relación de consistencia y la ecuación (9) se obtiene el índice de consistencia (CI) con un resultado de 0,132. El índice aleatorio es de 1.45 este resultado se obtuvo por el número de criterios a evaluar cómo se explicó anteriormente en la metodología. El resultado del índice de rendimiento se da empelando la ecuación 10 donde se obtiene un resultado de 0.09, con lo cual al no ser un número mayor a 0.1 las medidas son consistentes.

6.2.4 Resultados de los Métodos de Ponderación

Para el desarrollo del estudio es necesario realizar una comparativa de los 3 métodos de ponderación de pesos que se realiza a los 4 materiales candidatos de sus características mecánicas, como se muestra en la tabla 20.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 20

Resultados de métodos de ponderación de pesos.

Método	w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9
Entropía	0.152	0.068	0,074	0,167	0,099	0,070	0,089	0,151	0,131
Desviación estándar	0,008	0,616	0,011	0,316	0,003	0,001	0,013	0,030	0,001
AHP	0,088	0,070	0,098	0,142	0,112	0,062	0,227	0,093	0,104

La figura 19 muestra en forma gráfica los resultados de importancia de cada método (ranking), el método de DESVIACION ESTANDAR muestra las 3 principales características, donde la resistencia a la flexión (w6), resistencia a la tracción (w4) y embodied energy son las 3 principales propiedades para este método. El método AHP determina que los 3 principales atributos son la resistencia a la compresión (w7), resistencia a la tracción y el límite elástico tiene mayor peso en el método y por ultimo la Entropia da como prioridad a la resistencia a la tracción (w4), precio (w1) y a embodied energy, Cabe recalcar que son las 3 prioridades que más peso tiene como resultado de los métodos.

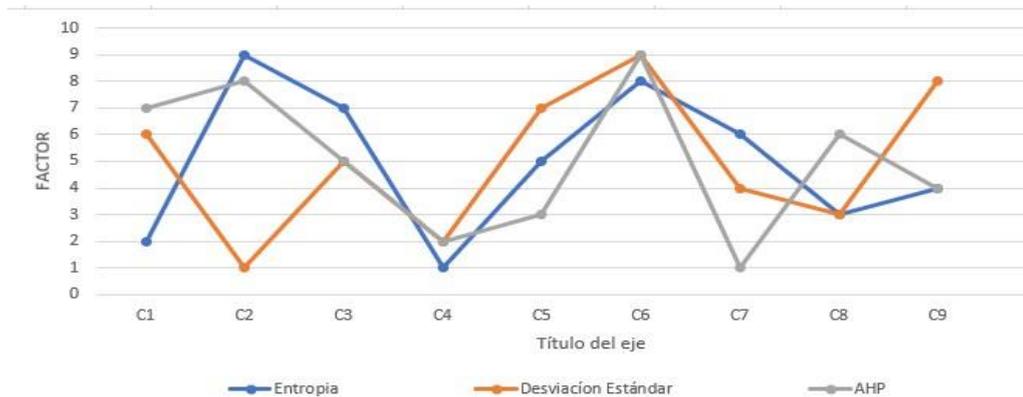
Al presentar los resultados obtenidos por medio de los diferentes criterios, se presta la resistencia a la compresión por medio del método AHP el cual da mayor prioridad a resistencia a la compresión debido a que es un factor importante al momento que la columna tiene una carga axial. Por otra parte, el método de Entropía da prioridad a la resistencia a la tracción y pone a la resistencia a la compresión en sexto lugar al contrario de la Desviación estándar la cual da prioridad a la densidad y pone en octavo lugar a la compresión. Por tanto, se escoge al método AHP para ser empleado en el uso

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

de ponderación de pesos en los MCDM para la selección del mejor material para ser empleado como refuerzo de la columna de concreto.

Figura 19

Resultados gráficos de métodos de ponderación de pesos.



6.2.5 Método VIKOR

Como resultado de este método se define las soluciones por separado donde los valores van de 1 a 0 determinando una medida de cercanía a la solución ideal. El valor más cercano a 0 será el ganador (Salazar-Loor et al., 2019).

- Contrición de matriz de decisión.

La matriz decisión agrupa todos los criterios de los materiales seleccionados.

Esta matriz se toma en cuenta para para la evaluación y desarrollo de los métodos multicriterio como se muestra a continuación.

$$X = \begin{bmatrix} 0.52 & 3090 & 15.6 & 3,48 & 1.03 & 4,69 & 31,2 & 2,91 & 0,251 \\ 0.8 & 2283 & 14,7 & 3,1 & 1,7 & 3,49 & 21,93 & 1,12 & 0,147 \\ 0.07 & 1730 & 16,4 & 10 & 1,13 & 1,72 & 5,32 & 0,72 & 0,139 \\ 17.3 & 1790 & 38,8 & 651 & 7,97 & 3,6 & 5,19 & 52 & 3,03 \end{bmatrix}$$

- Cálculo de índices de mejores y peores valores mediante las ecuaciones (11) y (12) como se muestra en la tabla 21.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 21

Resultado de mejores y peores valores método VIKOR.

Criterios	Mejor Valor	Peor Valor
Costo	0.007	10.1
Densidad	1730	3090
Módulo de Young	38.8	14.7
Resistencia a la tracción	626	3.1
Limite elástico	7.97	1.13
Resistencia a la flexión	4.69	1.72
Resistencia a la compresión	31.2	5.19
Embodied energy	0.72	52
Footprint	0.139	3.03

➤ Resultado de soluciones óptimas.

La tabla 22 muestra los resultados del cálculo de soluciones óptimas tomando en cuenta la relevancia y covalencia esto se determina aplicando la ecuación (13) y (14). Donde $S_i \max = 0.831$, $S_i \min = 0.362$, $R_i \max = 0.227$ y $R_i \min = 0.142$.

Tabla 22

Resultados de soluciones optimas VIKOR.

Soluciones Optimas U_i	Resultado	Soluciones Optimas R_i	Resultado	Soluciones Optimas Q_i	Resultado	Rankig
U1	0.612	R1	0.1428	Q1	0	1
U2	0.678	R2	0.1429	Q2	0.340	2
U3	0.829	R3	0.226	Q3	0.993	4
U4	0.342	R4	0.227	Q4	0.500	3

➤ Resultado de estabilidad y ventaja aceptable

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Cálculo de estabilidad y ventaja aceptable se da mediante las ecuaciones (15) y (16) dando un resultado de condición de ventaja aceptable, donde DQ tiene como resultado 0.333 al comparar con $Q2-Q1$ que su valor es de 0.345 este cumple con la condición de ventaja aceptable. Teniendo en cuenta que $R1$ tiene una respuesta de 0.1428 que es menor al valor de $R2$ con un valor de 0.1429 donde se cumple con las condiciones de aceptabilidad, mientras que para U_i arroja una repuesta $U4$ de 0.342 con esto se determina que se cumple la aceptabilidad, aunque el material no tiene el mejor valor en U_i si lo es en R_i .

6.2.6 Resultados Método VIKOR.

El estudio del método VIKOR detalla el Ranking de los materiales mostrados en la tabla 23. Mediante esta herramienta como muestra la figura 20 se obtiene los materiales ganadores el cual es la cascarilla de arroz (F1), el segundo material es la fibra de Pambil (F2) y el tercero es la fibra de plástico reciclado (F4).

Tabla 23

Resultados obtenidos método VIKOR.

Alternativa	Ranking
Ceniza de cascarilla de arroz (F1)	1
Fibra de Pambil (F2)	2
Fibra de Banano (F3)	4
Fibra de Plástico reciclado (F4)	3

Como resultado del método VIKOR se determina que el material con mejor ponderación fue la ceniza de cascarilla de arroz donde obtuvo un valor de 0, el segundo material es la fibra de pambil con un valor de 0.34, el tercer material es la fibra de

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

plástico reciclado con un valor de 0.50 y el cuarto material es la fibra de banano con un valor de 0.99 cabe mencionar que el valor más cercano a 0 es el ganador como se muestra en la figura 20.

Figura 20

Resultados gráficos del método VIKOR.



El estudio realizado por (Cueva, 2020) utilizó el método VIKOR para la selección de un material alternativo híbrido o no convencional señalando como material ganador al bambú donde se determina que se otorga preferencia a los materiales enfocándose en la resistencia a la compresión.

6.2.7 Método COPRAS

Se obtiene el rendimiento de las alternativas las cuales tienen los mejores resultados con respecto a los diferentes criterios a las decisiones ideales y no ideales enfocándose en la importancia y grado de utilidad como se muestra a continuación.

El resultado del método COPRAS se da a partir de la implementación de la matriz de decisión del método de Entropía.

- A fin de obtener el resultado de la matriz normalizada se emplea la ecuación (18), dando como resultado la matriz R_{ij} .

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.028 & 0.347 & 0.182 & 0.005 & 0.468 & 0.347 & 0.490 & 0.051 & 0.070 \\ 0.043 & 0.257 & 0.172 & 0.005 & 0.097 & 0.259 & 0.345 & 0.020 & 0.041 \\ 0.004 & 0.195 & 0.192 & 0.015 & 0.064 & 0.127 & 0.084 & 0.013 & 0.039 \\ 0.926 & 0.201 & 0.454 & 0.975 & 0.453 & 0.267 & 0.082 & 0.916 & 0.849 \end{bmatrix}$$

- Resultado de la matriz estandarizada de peso V_{ij} .

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} 0.002 & 0.024 & 0.018 & 0.001 & 0.052 & 0.020 & 0.111 & 0.005 & 0.007 \\ 0.004 & 0.018 & 0.017 & 0.001 & 0.011 & 0.016 & 0.078 & 0.002 & 0.004 \\ 0 & 0.014 & 0.019 & 0.002 & 0.007 & 0.008 & 0.019 & 0.001 & 0.004 \\ 0.082 & 0.014 & 0.045 & 0.139 & 0.051 & 0.017 & 0.019 & 0.086 & 0.089 \end{bmatrix}$$

- Las ecuaciones (19) y (20) se emplean para obtener el resultado de pesos normalizados como se muestran en la tabla 24.

Tabla 24

Pesos normalizados.

Variable	S+	S-
F1	0.204	0.039
F2	0.123	0.028
F3	0.055	0.019
F4	0.270	0.271

- El resultado de las prioridades relativas se obtiene por medio de la ecuación (21) como se detalla en la tabla 25.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 25

Resultado de prioridades relativas.

Variable	Qi
Q1	0.282
Q2	0.231
Q3	0.213
Q4	0.281
MAX Qi	0.282

- El cálculo del rendimiento por niveles seda por medio de la ecuación (22) ya que con esto se obtiene el porcentaje del rendimiento de las fibras y su ranking.
- El resultado del ranking de soluciones se da a partir del criterio donde el material que posee el valor más alto es el ganador en el método COPRAS como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26

Ranking de soluciones método COPRAS.

Alternativa	Valor	Ranking
Ceniza de cascarilla de arroz (F1)	100 %	1
Fibra de Pambil (F2)	82 %	3
Fibra de Banano (F3)	67.7 %	4
Fibra de Plástico reciclado (F4)	99.4 %	2

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

6.2.8 Resultados Método COPRAS.

Como resultado del método Copras se toma encuentra las tres primeras posiciones donde se obtiene en primer lugar a la ceniza de la cascarilla de arroz (F1), el segundo lugar a la a la fibra de plástico reciclado (F4) y en tercer lugar la fibra de pambil (F3). Donde le valor más alto es el ganador posicionando a la ceniza de cascarilla de arroz como material ganador con un valor de 1, el segundo material es la fibra de plástico reciclado con un valor de 0.996, el tercer material corresponde a la fibra de pambil con un valor de 0.820 y el cuanto material es la fibra de banano con un valor de 0.756 como se muestra la figura 21.

Figura 21

Resultados gráficos del método COPRAS.



En el estudio de (Penadés, 2017) emplea el método COPRAS para evaluar varios tipos de concretos para mejorar los principios de sostenibilidad y ciclo de vida de un puente, al emplear el método da como resultado al hormigón de 35 MPa.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

6.2.9 Método TOPSIS

Como resultados se obtiene las alternativas de solución más cercana de la solución ideal positiva de valoración alejándose de los resultados negativo. El resultado positivo eleva los criterios de beneficio, por lo contrario, la solución ideal negativa se la disminuye los criterios beneficiosos como se detalla a continuación.

- El resultado del método TOPSIS se da a partir de la implementación de la matriz de decisión del método de Entropía.
- A fin de obtener el resultado de la matriz normalizada se emplea la ecuación (23), dando como resultado la matriz R_{ij} .

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} 0.030 & 0.675 & 0.330 & 0.006 & 0.124 & 0.663 & 0.812 & 0.056 & 0.082 \\ 0.046 & 0.499 & 0.311 & 0.005 & 0.205 & 0.493 & 0.553 & 0.021 & 0.048 \\ 0.004 & 0.378 & 0.347 & 0.016 & 0.136 & 0.243 & 0.134 & 0.014 & 0.046 \\ 0.998 & 0.391 & 0.821 & 1.00 & 0.961 & 0.509 & 0.131 & 0.998 & 0.994 \end{bmatrix}$$

- Al emplear la ecuación (25) da como resultado la matriz estandarizada de pesos como se detalla continuación.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} 0.002 & 0.047 & 0.032 & 0.0007 & 0.013 & 0.0413 & 0.184 & 0.005 & 0.008 \\ 0.004 & 0.034 & 0.030 & 0.0007 & 0.022 & 0.030 & 0.125 & 0.002 & 0.005 \\ 0.0003 & 0.026 & 0.034 & 0.002 & 0.015 & 0.015 & 0.030 & 0.001 & 0.004 \\ 0.088 & 0.027 & 0.081 & 0.142 & 0.107 & 0.031 & 0.029 & 0.093 & 0.103 \end{bmatrix}$$

- La ecuación (26) y (27) se emplean para obtener los resultados de las soluciones ideales como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27

Soluciones ideales positivas y negativas.

Solución ideal positiva	0.0003	0.026	0.081	0.142	0.107	0.041	0.184	0.093	0.004
Solución ideal negativa	0.088	0.047	0.030	0.000	0.013	0.015	0.029	0.001	0.103

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Obtención de los valores positivos S+ y valores negativos S- empleando las ecuaciones (28) y (29), estos resultados se muestran en la tabla 28.

Tabla 28

Valores de soluciones positivas y negativas.

Variable	Valores de solución	Valores de solución	Solución
	positiva	negativa	ideal
F1	0.039	0.041	0.504
F2	0.041	0.026	0.443
F3	0.063	0.018	0.347
F4	0.041	0.040	0.497

- Al aplicar la ecuación (30) se obtiene los resultados del cálculo de solución próxima ideal positivo ya que con este resultado se da el ranking de soluciones y la fibra ganadora.
- La tabla 29 muestra el ranking de materiales donde el valor más alto es el ganador.

Tabla 29

Ranking de fibras ganadoras método TOPSIS.

Variable	Solución ideal	Ranking
F1	0.504	1
F2	0.443	3
F3	0.347	4
F4	0.497	2

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

6.2.10 Resultados del método TOPSIS.

Como resultado del método TOPSIS se toma encuentra las tres primeras posiciones donde se obtiene en primer lugar a la ceniza de la cascarilla de arroz (F1), el segundo lugar a la a la fibra de plástico reciclado (F4) y, en tercer lugar, la fibra de pambil (F3) como se muestra en la figura 22. TOPSIS señala que el valor más alto es el ganador donde la ceniza de cascarilla de arroz con un valor de 0.504 se posiciona como el material ganador, el segundo material es el plástico reciclado con un valor de 0.497, el tercer material es la fibra de pambil con un valor de 0.443 y el cuarto marial es la fibra de banano con un valor de 0.347.

Al tener valores equivalentes entre dos materiales en este caso la ceniza de cascarilla de arroz y el plástico reciclado esto implica que los dos componentes al ser empleados como refuerzos en la columna de hormigón pueden brindar características físicas y mecánicas similares en un resultado final (Salazar-Loor et al., 2019).

Por otra parte, el método COPRAS Y TOPSIS tienen el mismo ranking lo que refleja que las dos variables están relacionadas en el resultado obtenido donde la ceniza de cascarilla de arroz el material ganador seguido de la fibra de pambil. Este resultado es similar al expuesto por el estudio de (Yaselga, 2021) donde obtiene un mismo resultado en los métodos VIKOR Y COPRAS dando consistencia a sus resultados, donde el bambú es el material ganador mediante el Rankin obtenido.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 22

Resultados gráficos del método TOPSIS solución ideal.



El estudio de (Penadés, 2017) emplea el método TOPSIS para la toma de decisiones en la selección del hormigón apropiado el cual resista las condiciones ambientales, para obtener un ciclo de vida de alto rendimiento y minimizar mantenimientos, en el diseño sostenible de un puente dando como ganador al concreto de 50MPa.

6.3 Resultados de métodos multicriterio

Todos los valores del ranking de cada método se muestran en la figura 23 la cual es una comparación de los resultados de los métodos multicriterio empleados en el análisis del estudio, teniendo en cuenta que el método VIKOR, TOPSI y COPRAS tienen el mismo resultado dando como ganador a la ceniza de cascarilla de arroz. Por otra parte, los métodos TOPSIS Y COPRAS tiene en segundo lugar un mismo material ganador es por ello que en el resultado del gráfico se observa que los dos métodos tienen la misma gráfica. La tabla 30 muestra el ranking el cual es el resultado de los diferentes métodos.

Al ser la cascarilla de arroz el material ganador se implementará a la columna de concreto para el refuerzo de la misma donde se presenta un aporte en la resistencia y disminuye el consumo de cemento referente al suministrado a la columna.

El estudio realizado por (Yaselga, 2021) detalla la selección de un material alternativo sostenible una viga de acero estructural en la construcción donde se detalla un ganador

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

en los métodos TOPSIS, VIKOR y COPRAS dando una correlación positiva muy fuerte en la toma de decisión, dando como ganador al Bambú siendo este el material alternativo que sustituirá a la viga acero estructural.

Tabla 30

Resultado de cada método en forma de ranking.

Fibra	VIKOR	TOPSIS	COPRAS
Ceniza de cascarilla de arroz (F1)	1	1	1
Fibra de Pambil (F2)	2	3	3
Fibra de Banano (F3)	4	4	4
Fibra de Plástico reciclado (F4)	3	2	2

Figura 23

Resultados gráficos de cada método.



6.4 Coeficiente Spearman.

Al finalizar el análisis empleando los métodos multicriterio se utiliza la correlación Spearman para validar los resultados obtenidos. Debido a que los valores presentan incertidumbre entre las alternativas propuestas en el estudio. Los resultados se presentan

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

a continuación. La tabla 31 muestra los resultados obtenidos por medio de la correlación Spearman entre los métodos VIKOR, TOPSIS y COPRAS.

Tabla 31

Resultados de correlación Spearman.

Variable	VIKOR	TOPSIS	COPRAS
VIKOR	-	0.8	0.8
TOPSIS	0.8	-	1.0
COPRAS	0.8	1.0	-

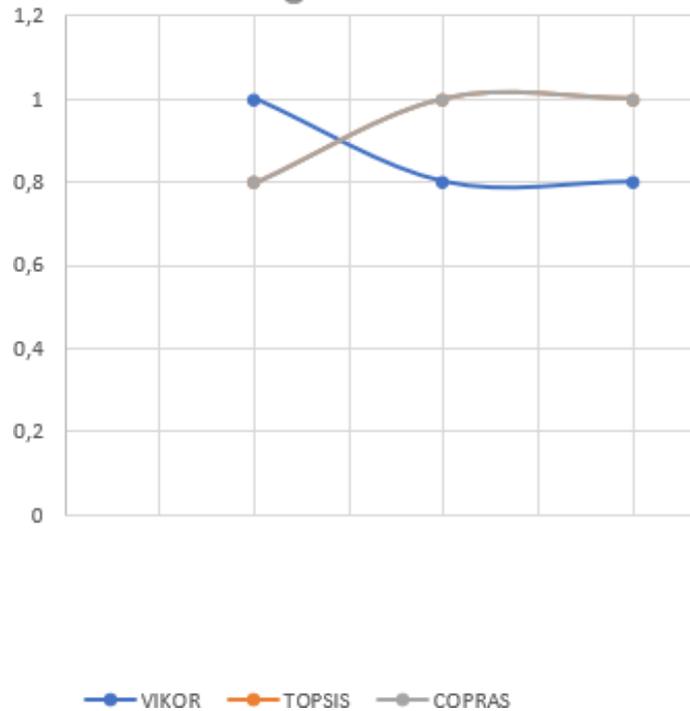
Como resultado se tiene una correlación entre el método VIKOR y TOPSIS reflejando un valor de 0.8 el cual tiene un grado de correlación positiva muy fuerte. Por otro lado, el método TOPSIS y COPRAS evidencia un valor de 1 obteniendo así una correlación positiva perfecta, de igual forma al relacionar los métodos COPRAS y TOPSIS se obtiene una correlación positiva muy fuerte con un valor de 0.8. La figura 24 muestra el análisis de correlación de los métodos donde se muestra que existe una compatibilidad en la respuesta de los métodos VIKOR, TOPSIS y COPRAS. Por otro lado, el gráfico indica que existe una semejanza en la correlación positiva perfecta del método VIKOR y TOPSIS.

En este aspecto se determina que la correlación que existe entre los 3 métodos dando como solución ganadora a la ceniza de cascarilla de arroz sin que exista una disidencia entre los métodos obteniendo entre los métodos una correlación positiva muy fuerte y positiva perfecta.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 24

Análisis grafica de correlación Spearman.



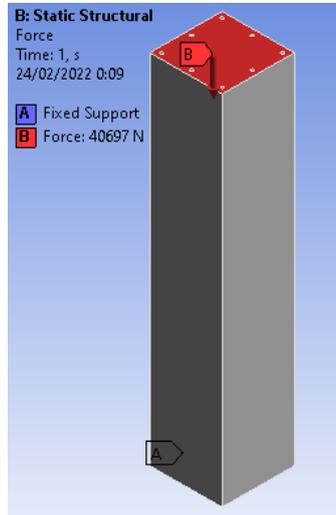
7.1 Resultados de simulación estática

Para el desarrollo del estudio es necesario realizar el diseño de la columna de concreto, es por ello que la simulación se da por medio del programa ANSYS. Esta herramienta permite simular cargas estáticas en la estructura de la columna, el término que se asignó la fuerza representa a la carga de 40697 N es la más crítica con la cual se debe simular ya que esto permite evaluar el comportamiento de la columna con el material ganador, el cual es la ceniza de la cascarilla de arroz y comparar con la columna de concreto sin ninguna fibra como muestra la figura 25.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 25

Fuerza ejercida sobre la columna de concreto.

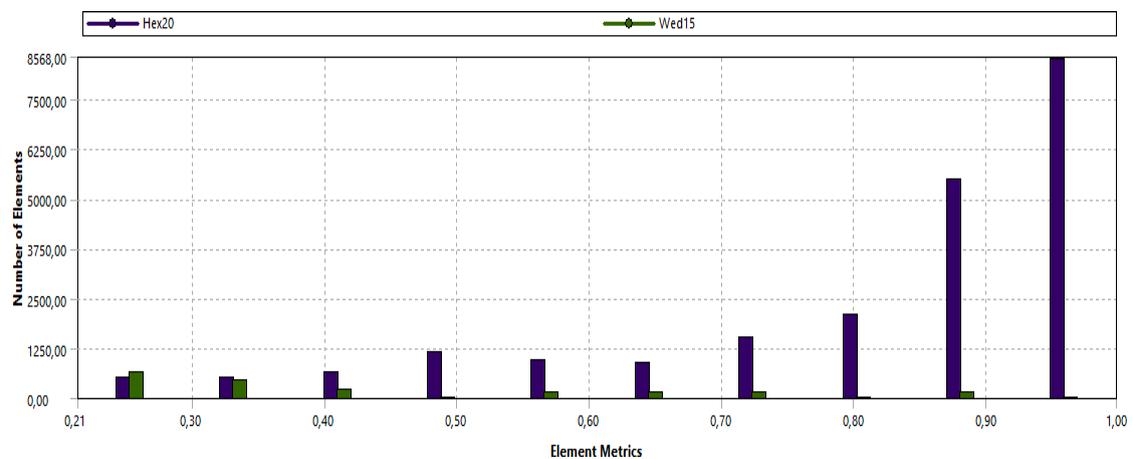


Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

Al realizar la simulación del análisis de compresión es importante tener en cuenta la calidad del elemento para tener un nivel confiable en los resultados de la simulación como se muestra en la figura 26.

Figura 26

Calidad del elemento.



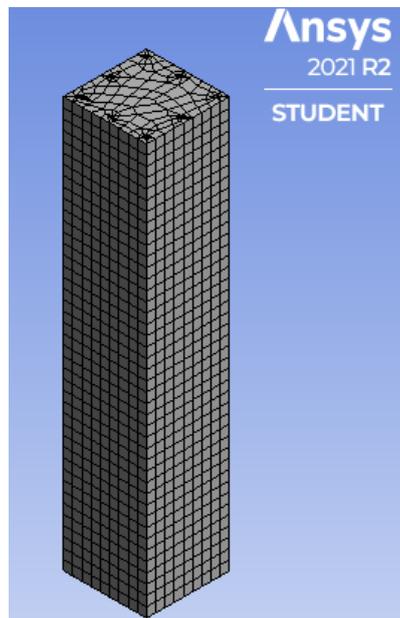
Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

La figura 27 muestra la malla creada en la columna donde se obtiene como resultado 106861 nodos y 24048 elementos. Estos datos permiten analizar elemento obteniendo las características mecánicas del material del cual está compuesta la columna.

Figura 27

Resultado de mallado.



Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

Dentro de la simulación estática se toma en consideración los resultados de las características mecánicas como los esfuerzos-deformación y desplazamientos. La tabla 32 muestra los resultados de las principales características mecánicas de la columna de concreto sin fibras ya que con estos valores serán comparar los resultados obtenidos de la columna de concreto con la ceniza de cascarilla de arroz y concreto.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 32

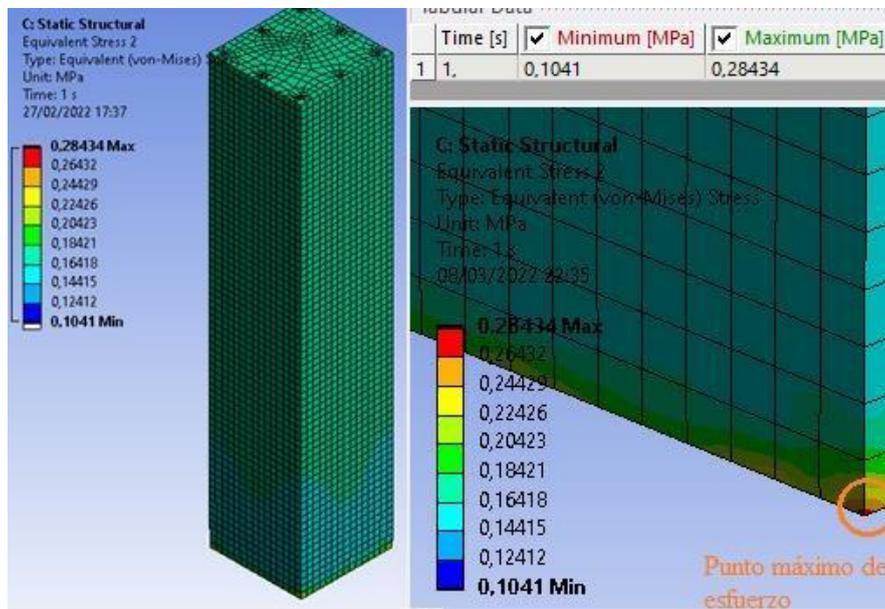
Características mecánicas de la columna de concreto.

Concreto	Max	Min
Esfuerzo de Von Mises columna de concreto (MPa)	0.283	0.104
Desplazamiento columna de concreto (mm)	0.013	0

La figura 28 muestra el esfuerzo de Von Mises donde se produce una energía de distorsión que se puede presentar como como un fallo del material. Este resultado permite trabajar en un rango permisible para evitar fallas estructurales.

Figura 28

Esfuerzo de Von Mises columna de concreto.



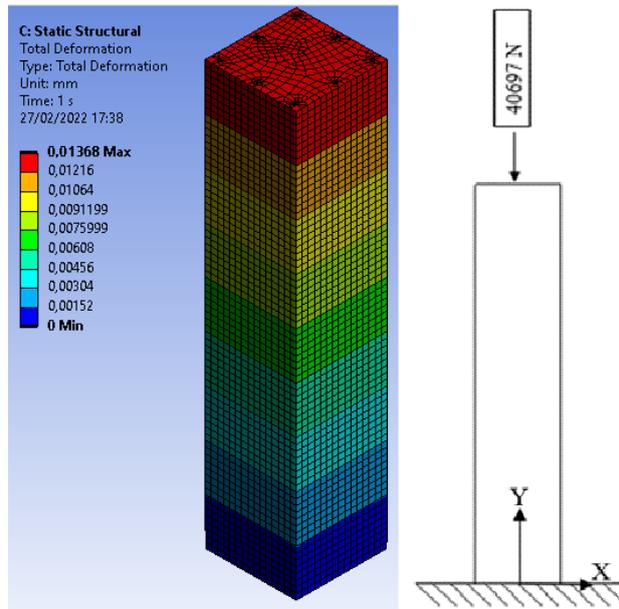
Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

El desplazamiento del concreto se muestra en la figura 29 el cual es mínimo sin provocar cambios físicos ni alteraciones geométrica en la misma.

Figura 29

Desplazamiento columna de concreto y diagrama de cuerpo libre.



Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

Como se puede evidenciar en la simulación el esfuerzo máximo es de 0.28 MPa, con lo cual se debe realizar una validación como se muestra a continuación, al calcular el esfuerzo normal (σA) del concreto el cual es la fuerza (P) sobre el área (A).

$$\sigma A = \frac{P}{A} = \frac{-40697 \text{ N}}{250000 \text{ m}^2} = -0.2 \text{ MPa}$$

Un punto ha tomar en cuenta es el no tener esfuerzos cortantes ya que con esto se procede a calcular el esfuerzo de Von Mises mediante la teoría de energía de distorsión empleando la siguiente ecuación.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_A)^2 - \sigma_A \cdot \sigma_B + (\sigma_B)^2}$$

$$\sigma = \sqrt{(0.2)^2} = 0.2 \text{ MPa}$$

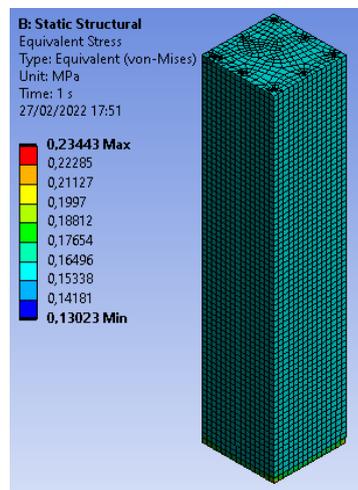
Al tener este resultado se puede determinar que el valor obtenido por el software ANSYS STUDENT concuerda con el valor conseguido por medio del calculo manual evidenciando una respuesta correcta del software.

7.1.1 Resultado de esfuerzo-deformación, Von Mises del concreto con cascarilla ceniza de cascarilla de arroz.

Al tener el esfuerzo de Von Mises se toma en cuenta la teoría de fallo del elemento. Donde se puede determinar un esfuerzo máximo de 0.283 MPa en la columna de concreto con ceniza de cascarilla de arroz como se muestra en la figura 30 y la tabla 33, este esfuerzo es mínimo considerando el límite de fluencia del concreto el cual es mayor. Esta energía de distorsión se presenta como un fallo del material esta teoría es empleada para los materiales dúctiles debido a que permite trabajar en un rango permisible para evitar fisuras y rupturas del mismo (Budynas & Keith, 2001).

Figura 30

Esfuerzo-deformación del concreto con cascarilla de arroz.



SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Funete: (Ansys Stusent, 2021).

Tabla 33

Esfuerzo-deformación, Von Mises de la columna de concreto con fibras.

Concreto	Max	Min
Von Mises concreto con ceniza de cascarilla de arroz	0.234	0.130

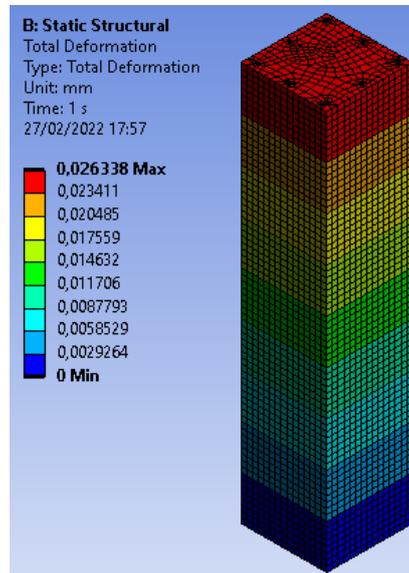
7.1.2 Resultados de desplazamiento

Los resultados del desplazamiento estas ligados a los esfuerzos que de generar a consecuencia de la carga implantada en la columna de hormigón con ceniza de cascarilla de arroz como se muestra en la figura 31. Como resultado por la fuerza de compresión se tiene un desplazamiento máximo de 0.026 mm, donde el material ganador implantado al hormigón no representa un efecto negativo en su estructura como se muestra en la figura 31. Al actuar cargas sobre la columna de concreto produce desplazamientos debido a la fuerza de deformación total con respecto a la fuerza aplicada al sistema, este desplazamiento debe ser mínimo ya que no debe afectar a la estabilidad estructural sin causar efectos adversos en la columna (Budynas & Keith, 2001).

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Figura 31

Desplazamiento principal de la columna con ceniza de cascarilla de arroz.



Fuente : (Ansys Stusent, 2021).

La tabla 34 muestra el desplazamiento existente como resultado de la simulación de la columna de concreto con dos materiales seleccionados mediante la evaluación de los métodos multicriterio.

Tabla 34

Desplazamientos de la columna de concreto con fibras.

Concreto	Max	Min
Desplazamiento concreto con ceniza de cascarilla de arroz	0.0263	0

7.1.3 Comparación de resultados

El estudio se enfoca en la selección un material para el refuerzo de una columna de concreto teniendo en cuenta la reducción de materiales pétreos empleados para la creación de la misma. De esta manera se podrá reducir el consumo energético y las emisiones de CO_2 en el ambiente.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 35

Resultados de energía y huella de carbono.

	CO2 Footprint kg/kg	Embodied energy MJ/kg
Concreto	0.459	2.93
Ceniza de cascarilla de arroz con concreto	0.251	2.91

Fuente : (EduPack, 2019).

La huella de carbono y la energía empleada para fabricar el concreto con ceniza de cascarilla de arroz son menores en comparación a los valores obtenidos para la fabricación de concreto sin ningún tipo de componente en su mezcla, como se muestra en la tabla 35, al elaborar el concreto con ceniza obtiene un resultado de 0.45 el cual es menor al elaborar concreto que obtiene un valor de 0.128, siendo beneficioso al medio ambiente al reducir la contaminación. Lo mismo sucede en la energía empleada para la fabricación del compuesto, donde el concreto de ceniza de cascarilla de arroz obtiene un valor de 2.91 siendo menor al compuesto de concreto con un valor de 2.93, lo que representa un menor consumo de energía empleada para su creación.

Al comparar los resultados de las simulaciones con los dos diferentes tipos de materiales se puede determinar que la mejor alternativa es el concreto con cascarilla de arroz al obtener resultados favorables en comparación con el concreto como lo muestra la tabla 36 y la figura 32.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Tabla 36

Resultados de simulación de la columna con fibras con concreto.

Resultado de simulación	Max	Min
Von Mises		
Von Mises concreto con ceniza de cascarilla de arroz	0.234	0.130
Esfuerzo de Von Mises columna de concreto	0.283	0.104
Desplazamiento		
Desplazamiento concreto con ceniza de cascarilla de arroz	0.026	0
Desplazamiento columna de concreto	0.013	0

Figura 32

Resultados de simulación en comparativa.



Como resultado final el concreto con ceniza de cascarilla de arroz se presenta como el material más idóneo para ser empleado en la construcción de la columna, ya que este tiene propiedades mecánicas las cuales que satisfacen las necesidades al momento de construir. Este material también cumple con aspectos sostenibles, ambientales y económicos.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

La cascarilla está compuesta básicamente por dióxido de silicio, el cual se obtiene exponiendo este material a un proceso térmico que alcanza los 800 ° C en un horno durante un período de una hora en el cual se optime la sílice con un alto grado de pureza que va a variar entre el 87% – 97 % en forma de ceniza obteniendo mejores resultados en la elaboración de concreto (Pérez e Higuera, 2017). También se detalla que al usar la ceniza de cascarilla de arroz disminuye reduce el impacto ambiental debido a que este elemento no tiene una disposición final y es arrojada en terrenos esperando su degradación.

El estudio realizado por (Serrano, Borrachero, Monzó, & Payà, 2012) determina que al implantar la ceniza de cascarilla de arroz mejora la calidad del concreto, aumenta la propiedades mecánicas de la mezcla a los 28 días de curado.

Se denota el aumento en la resistencia a la compresión, flexión y tracción como lo detalla el estudio de (Gautam et al., 2019) donde también detalla una disminución del costo del concreto y reducción del costo de construcción.

7. Conclusiones

Se determina en el estudio que la ceniza de cascarilla de arroz es la materia óptima para ser implementado como refuerzo gracias a sus propiedades físicas y mecánicas. Donde también como segunda alternativa esta la fibra de pambil.

Se desarrollo un estudio del arte basada en los métodos multicriterio para evaluar las características mecánicas de diferentes materiales donde los métodos multicriterio determina que la ceniza de cascarilla de arroz es el material ganador para el refuerzo de la columna de concreto.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

En el presente estudio se empleó el software CES Edupack con su modulo Eco Design y su herramienta synthesizer, el cual permite predecir el rendimiento de nuevos modelos de materiales ya que con esto se obtiene características mecánicas las cuales son fundamentales para el análisis de los métodos multicriterio.

Mediante la simulación por medio del software ANSYS se consigue de manera virtual el prototipo de columna de concreto con ceniza de cascarilla de arroz, donde se puede evidenciar que la carga aplicada no crea desplazamientos que pongan en inestabilidad la estructura de la columna debido a que se obtiene un desplazamiento máximo de 0.013 mm.

Gracias a la implementación de ponderación de pesos se determina que el método AHP es el método apropiado para ser utilizado en el estudio, debido al procesos de jerarquía analítica que ayuda la toma de dicciones complejas donde la resistencia a la compresión es el criterio con más importancia.

8. Recomendaciones

Al utilizar fibras naturales se recomienda realizas futuras investigaciones enfocadas en la simulación de vibraciones debido a que estamos en un País con relieves geográficos irregulares y altamente sísmicos para verificar su comportamiento frete a esta situación.

Al tener fibras naturales se debe realizar un estudio de viabilidad en términos de sostenibilidad en la implantación de fibras al concreto para poder disminuir el impacto ambiental y costos de construcción.

Al implementar investigaciones las cuales se enfocan en la resistencia a la compresión, flexión y tracción para obtener las características mecánicas de los materiales mezclados

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

al concreto es recomendable realizar ensayos al material ganador para obtener mayor información de sus características mecánicas y físicas.

9. Bibliografía

Alvarado Romero, H. F. (2014). ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO CON ADICIÓN DE FIBRAS DE PAMBIL.

Ansys Stusent. (2021). Ansys Stusent. Retrieved February 23, 2022, from <https://www.ansys.com/academic/students>

Budynas, R., & Keith, N. (2001). *Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley - 8va.*

Caiza Sánchez, P., & Viera Arroba, P. (2019). *Diseño De Columnas, Muros Estructurales Y Diafragmas En Hormigón Armado. Comisión Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Vol. 1)*. Retrieved from [http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/21345/1/Diseño de columnas y muros estructurales.pdf](http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/21345/1/Diseño%20de%20columnas%20y%20muros%20estructurales.pdf)

Caizaguango, O., & Terán, G. (2020). Escuela politécnica nacional.

Camargo Pérez, N. R., & Higuera Sandoval, C. H. (2017). Concreto hidráulico modificado con sílice obtenida de la cascarilla del arroz. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(1), 91–109. <https://doi.org/10.18359/rcin.1907>

Cardenas, J. A. (2019). Poder calorífico de la cascarilla de arroz, (January).

Cevallos Cevallos, A. R., & Cordero Acosta, E. S. (2020). *Estudio de elementos estructurales (columnas) tipo I con madera laminar contrachapada a escala real. Trabajo*. Quito: UCE. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/21856>

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Chen, X., & Liu, Y. (2014). *Finite element modeling and simulation with ANSYS workbench. Finite Element Modeling and Simulation with ANSYS Workbench*.
<https://doi.org/10.1201/b17284>
- Cueva, B. (2020). Selección de material alternativo híbrido o no convencional para la construcción, utilizando métodos multicriterio y simulación de esfuerzos-deformación para optimizar el material. Retrieved from
<http://localhost:8080/xmlui/handle/123456789/3901>
- EduPack, C. (2019). CES EduPack 2019. *Granta*. Retrieved from
<http://support.grantadesign.com/resources/cesedupack/2019/learn/index.htm>
- Estrada García, J. M. (2002). Asignación de pesos no subjetivos para la valuación, (2024306), 1–56. Retrieved from
https://infonavit.janium.net/janium/TESIS/Maestria/Estrada_Garcia_M_en_I_Jose_Martin_45491.pdf
- Fraga, J. (2015). *Caracterización mecánica de un material compuesto con fibra natural de banano y resina de poliéster para la aplicación en una moldura del panel del optra 1.8*.
- Gautam, A., Batra, R., & Singh, N. (2019). *Engineering Heritage Journal (GWK)*, 3(1), 1–4.
- Godoy, J. (2018). *Urbanización e industrialización en Ecuador Urbanization and industrialization in Ecuador. Revista Vista Económica* (Vol. 4). Retrieved from
<https://revistas.unl.edu.ec/index.php/economica/article/view/507>
- Hernández Jatib, Naísma; Ulloa Carcasés, Mayda; Rosario Ferrer, Y. (2011). Impacto ambiental de la explotación del yacimiento de materiales de construcción El Cacao.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Minería y Geología, 27(1), 38–53.

INEN. (2012). *CEMENTO PORTLAND*. Retrieved from

<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/152-5.pdf>

Infante, J., & Valderram, C. (2019). Technical, Economic and Environmental Analysis of the manufacture of concrete blocks with Recycled Terephthalate Polyethylene (PET). *Informacion Tecnologica*, 30(5), 25–36. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000500025>

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>

Juan Muñoz. (2014). *EFFECTOS DE LA SILICE AMORFA EN LAS PROPIEDADES CRISTALOQUIMICAS Y MECANICAS DEL HORMIGON EN UN MEDIO SALINO*. Retrieved from

<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/bmfcim9711e/doc/bmfcim9711e.pdf>

Juna Pozo, L. P. (2021). Incidencia del agua, ripio, arena y diferentes tiempos de curado, en la calidad del hormigón para la construcción, empleando los agregados del cantón Pedernales, Provincia de Manabí en el año 2020. Retrieved from <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/22877>

Kassimali, A. (2015). *Análisis estructural - Quinta edición*. CENGAGE Learning.

Retrieved from <https://civilmas.net/libros/analisis-estructural-aslam-kassimali/>

L. Mott, R. (2004). Diseño de elementos de máquinas. 944, 4, 946. Retrieved from www.pearsoneducacion.net

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Manuel, J., & Robles, M. (2017). *PRESENCIA DE ARCILLA O RESISTENCIA SECA- CONTROL DE FISURACIÓN CON ARENA GRUESA*. Pontificia Universidad Católica del Perú. Retrieved from http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/8679/MONTO_YA_ROBLES_JOSE_TESIS_CONSTRUCCION_TIERRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- 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>
- Melorse, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). Norma Ecuatoriana De La Construcción - Estructuras De Hormigon Armado, 1, 31. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Moaveni, S. (2007). *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS* (Vol. 2416514). Retrieved from <http://www.amazon.com/Finite-Element-Analysis-Application-Edition/dp/0131890808>
- Molina, R. (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. *Panorama*, 5–20.
- Molina Salas, E. (2010). *Evaluación del uso de la cascarilla de arroz en la fabricación de bloques de concreto*. ICOTEC- Escuela Ingeniería en Construcción- Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- MONCAYO, D. C. C. (2018). *ANÁLISIS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LADRILLOS FABRICADOS A PARTIR DE PLÁSTICO RECICLADO COMO MATERIAL DE*

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- CONSTRUCCIÓN. Journal of Materials Processing Technology*. Retrieved from
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127252>
- Mondragón, M. (2014). Correlación de Spearman. *Movimiento Científico*, 8(1), 98–1047.
- Mora Chacón, W. F. (2016). Concreto Ecológico a Partir de Material PET. *IDEA Ambiental*, 131, 3–14.
- 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.
- Navarro, J. (2013). *Barrigona (Iriartea deltoidea)* Pp. 55-62 en Bernal R. y G. Galeano (Eds.) *Cosechar sin destruir. Aprovechamiento sostenible de Palmas Colombianas*. (R. Bernal & G. Galeano, Eds.), *Cosechar sin destruir : aprovechamiento sostenible de palmas colombianas*. Bogotá: Bogotá:Facultad de Ciencias-Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia 244 pp.
- NEC SE Vivienda. (2015). Guía práctica para el dise.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño De Maquinas Un Enfoque Integrado. Diseño de Elementos de Máquinas*. Retrieved from
https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=nrYd_BjTL0UC&oi=fnd&pg=PA1&dq=%22sistemas+de+unidades%22&ots=1BKp2eod9D&sig=SwoWt30msLlcScDpGeL1DGKzRGY#v=onepage&q=%22sistemas+de+unidades%22&f=false

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

Odu, G. O. (2019). Weighting methods for multi-criteria decision making technique.

Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 23(8), 1449.

<https://doi.org/10.4314/jasem.v23i8.7>

Ortega, M. (2009). EL COEFICIENTE DE CORRELACION DE LOS RANGOS DE

SPEARMAN CARACTERIZACION. *Revista Habanera de Ciencias Médicas.*, 8.

Páez, A. (1986). *Hormigón armado - Alfredo Páez - Google Libros*. Retrieved from

<https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=5wfVaiKduB8C&oi=fnd&pg=PA25&dq=hormigón+armado&ots=dh1cpc5tcl&sig=nq1ndFc1z4R2MIxMC4Aiu3bZAf#w#v=onepage&q=hormigón+armado&f=false>

Penadés, V. (2017). Aplicación de la toma de decisión multicriterio al diseño sostenible

de puentes de hormigón, 1–88. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10251/89181>

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.

Piñeros, Mi., & Herrera, R. (2018). Proyecto de factibilidad económica para la

fabricación de bloques con agregados de plástico reciclado (PET), aplicados en la construcción de vivienda, 118. Retrieved from

<https://repository.ucatolica.edu.co/handle/10983/22382>

Rivadeneira, J. (2016). *CARACTERIZACIÓN DEL PAMBIL, PARA SER UTILIZADO*

COMO PILOTE. Socdecoaching.Com. Retrieved from

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12672/1/UPS->

[GT001700.pdf%0A%0A](https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12672/1/UPS-GT001700.pdf)

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

- Romero, H., Irarrázaval, F., Opazo, D., Salgado, M., & Smith, P. (2016). Urban climates and air pollution in Santiago, Chile. *Eure*, 36(109), 35–62.
<https://doi.org/10.4067/s0250-71612010000300002>
- Saaty, T. L. (1980). Hierarchical Analysis of Behavior in, 25, 180–191.
- Salas, A. (2017). Selección de Material Alternativo para la Fabricación por Inyección de Plástico de la Rejilla de, 25241.
- Salazar-Loor, R., Martínez-Gómez, J., Rocha-Hoyos, J., & Llanes-Cedeño, E. A. (2019). Métodos Multicriterio aplicados a la parte lateral de una estructura autoportante para vehículos livianos. *CienciAmérica*, 8(2), 59.
<https://doi.org/10.33210/ca.v8i2.172>
- Santiago, D., & Romero, B. (2018). *EVALUACIÓN DEL USO DE LOS RESIDUOS DE CASCARILLA DE ARROZ (Oryza sativa L.) COMO AGREGADO EN BLOQUES PARA LA CONSTRUCCIÓN.*
- Serrano, T., Borrachero, M. V., Monzó, J. M., & Payà, J. (2012). Morteros aligerados con cascarilla de arroz: Diseño de mezclas y evaluación de propiedades. *DYNA (Colombia)*, 79(175), 128–136.
- Suárez Hidalgo, C. X. (2012). Métodos de cálculo y su incidencia en el dimensionamiento de columnas de hormigón armado. Retrieved from <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/3049>
- Taherdoost, H., & Group, H. (2017). Decision Making Using the Analytic Hierarchy Process (AHP); A Step by Step Decision Making Using the Analytic Hierarchy Process (AHP); A Step by Step Approach 1 Analytical Hierarchy Process 2 Steps to Conduct AHP. *International Journal of Economics and Management System*, 2,

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)

244–246.

- Torrise, G. S., Crisafulli, F. J., & Pavese, A. (2012). Elemento Columna De Hormigon Armado Con Interaccion Corte-Axial Y Flexion-Axial. *Revista Internacional de ...*, (September 2015). Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Gonzalo_Torrise/publication/281649441_ELEMENTO_COLUMNA_DE_HORMIGON_ARMADO_CON_INTERACCION_CORTE-AXIAL_Y_FLEXION-AXIAL/links/55f2e4b508ae63926cefd698.pdf
- Tualombo, S. (2015). Desarrollo de un material compuesto a partir de fibras naturales para la utilización en viviendas, 117.
- Unapucha, F. M. S. (2019). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN Y COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN ADICIONANDO VIRUTAS DE ACERO COMERCIAL FUNDIDO Y EL HORMIGÓN CON FIBRAS DE ACERO COMERCIALES.*
- Valer, P. E. (ORCID: (2014). *Mejoramiento en el Diseño de un Pavimento Rígido Incorporando Fibras de Plástico PET Reciclado.*
- Vazquez, A., Beltrán, M., Espinosa, R. M., & Velasco, M. (2016). El origen de los plásticos y su impacto en el ambiente. *Researchgate*, 1–14. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/303045381_El_origen_de_los_plasticos_y_su_impacto_en_el_ambiente
- Yaselga, J. A. (2021). Selección de un material alternativo sostenible para una viga de acero estructural en la construcción utilizando un análisis de ciclo de vida, métodos multicriterio y simulación de esfuerzos-deformación para optimizar el material. *Panorama*, 19.

SELECCIÓN DE UN MATERIAL PARA REFUERZO DE COLUMNAS DE
HORMIGÓN ECOLÓGICO DE OBTENCIÓN NACIONAL POR MEDIO DE
MÉTODOS MULTICRITERIO (MCDM)