

OPTIMIZACIÓN DEL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL GENERADO POR
EL CONCRETO EN PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO



LUISA FERNANDA MONROY CÁRDENAS
KEINER LUCERO SÁNCHEZ

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2021

OPTIMIZACIÓN DEL POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL GENERADO POR
EL CONCRETO EN PÓRTICOS RESISTENTES A MOMENTO



LUISA FERNANDA MONROY CÁRDENAS
KEINER LUCERO SÁNCHEZ

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director:
OSCAR CONTRERAS BEJARANO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
MODALIDAD: TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
BOGOTÁ
2021



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#). [Advertencia](#).

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciente no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe dar [crédito de manera adecuada](#), brindar un enlace a la licencia, e [indicar si se han realizado cambios](#). Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciente.



No Comercial — Usted no puede hacer uso del material con [propósitos comerciales](#).



Sin Derivadas — Si [remezcla](#), [transforma](#) o [crea a partir](#) del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni [medidas tecnológicas que restrinjan legalmente](#) a otras a [hacer cualquier uso permitido por la licencia](#).

Nota de Aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá, 25 de junio 2021

RESUMEN

Esta investigación pretende identificar el conjunto de concretos modificados con cenizas volantes (FA), agregados reciclados finos (F), agregados reciclados gruesos (C) y super plastificante (SP) presentes en el estudio [1] que aplicados a tres pórticos de concreto resistente a momento disminuiría la mayor cantidad de Potencial de Calentamiento Global (GWP por su significado en inglés) emitido por el concreto. Esta investigación se realizó utilizando el Algoritmo de Evolución Diferencial (DEA) y la Optimización por Enjambre de partículas (PSO) acoplados con algoritmos de análisis matricial de pórticos bidimensionales. Por otro lado, la información de los concretos óptimos se evaluó a través de un análisis probabilístico con el fin de identificar los mejores concretos modificados y así generar una oportunidad de investigación respecto a la aplicabilidad de dichos concretos en la ingeniería civil en pro del medio ambiente.

DEDICATORIA

Para Luciana mi hija, sigue tus sueños vida mía.

Luisa Fernanda Monroy

Quiero dedicarle este trabajo de investigación a mis padres quienes gracias a su esfuerzo y apoyo se convirtieron en el principal motor de inspiración para llegar a culminar con éxito esta meta que hace 5 años y medio empecé, le dedico de manera especial también a mi compañera de tesis y novia quien me apoyo y animo en momentos donde sentía que no podía continuar, a ellos infinitas gracias.

Keiner Lucero

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecerle a mi mamá, todo lo que he logrado siempre ha sido gracias a ella, es la mejor mamá y abuela que la vida nos pudo dar. Por otro lado quiero agradecerle a mi papá quien en el transcurso de mi carrera me apoyo, aconsejo y oriento cuando más lo necesitaba.

Quiero darle las gracias a mi prima Erika, quien siempre ha estado conmigo en cada paso de mi vida y con quien quiero seguir compartiendo mis logros. Gracias a mis abuelos y hermanos que siempre me motivaron y acompañaron.

De igual manera, quiero darle las gracias a mi novio y compañero de carrera por brindarme su amor incondicional, por siempre estar a mi lado cuando más lo necesitaba y por motivarme en los buenos y malos momentos.

Por último quiero agradecerle a un gran docente y persona, nuestro asesor el ingeniero Oscar Contreras sin su orientación, paciencia y dedicación nada de esto hubiera sido posible.

Gracias a todos.

Luisa Fernanada Monroy

Primero que todo quiero agradecer a Dios por haber bendecido mi vida y haber guiado cada uno de mis pasos para superar las adversidades que se me presentaron a lo largo de este proceso. Quiero agradecer de manera especial a nuestro asesor Óscar Contreras quien nos apoyó y guió poniendo a nuestra disposición todo su conocimiento para este proyecto se desarrollará de la mejor manera, cada consejo, cada sugerencia fue muy importante y un aporte valioso para nosotros. Agradezco además a Daniel Esteban Neme que además de ser mi amigo, fue un apoyo constante en momentos difíciles, brindándole consejos que sirvieron de estímulo para continuar lleno de paciencia en este recorrido que hoy finaliza.

Keiner Lucero

Índice general

1. INTRODUCCIÓN	13
2. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN	14
2.1. ANTECEDENTES	14
2.2. JUSTIFICACIÓN	18
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	20
4. MARCO DE REFERENCIA	22
4.1. MARCO TEÓRICO	22
4.1.1. Algoritmo de Evolución Diferencial	22
4.1.2. Optimización por enjambre de partículas	27
4.1.3. Pórticos 2D	30
4.1.4. Prueba de bondad de ajuste Shapiro-Wilk	45
4.1.5. Prueba de bondad de ajuste K-S	45
4.1.6. Intervalos de confianza	46
4.2. MARCO CONCEPTUAL	48
5. ESTADO DEL ARTE	50
6. OBJETIVOS	56
6.1. OBJETIVO GENERAL	56
6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	56
7. ALCANCES Y LIMITACIONES	57
7.1. ALCANCES	57
7.2. LIMITACIONES	57
8. METODOLOGÍA	58
8.1. FASE 1. RESTRICCIONES DE DESPLAZAMIENTOS	58
8.2. FASE 2. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN	59
8.3. FASE 3. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO	61
9. MODELOS A OPTIMIZAR	62
9.1. PÓRTICO DE 3 PISOS	62
9.2. PÓRTICO DE 6 PISOS	66

9.3. PÓRTICO DE 9 PISOS	69
10. ALGORITMOS ACOPLADOS	73
10.1. ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL	73
10.2. OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS .	77
11. PÓRTICOS OPTIMIZADOS	78
12. ANÁLISIS PROBABILISTA	86
12.1. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE	86
12.1.1. Prueba de Shapiro-Wilks	86
12.1.2. Prueba Kolmogorov - Smirnov	87
12.2. INTERVALOS DE CONFIANZA	92
13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	94

Índice de figuras

4.1.	Diagrama de flujo generación de población combinada	26
4.2.	Fuerzas iniciales en coordenadas locales	30
4.3.	Fuerzas iniciales en coordenadas globales	31
4.4.	Vectores coordenadas locales	31
4.5.	Descomposición del vector P_t	33
4.6.	Deformaciones axiales ocasionadas por P_i	36
4.7.	Momento M_m en dirección r	38
4.8.	Momento M_m en dirección r	39
4.9.	Fuerzas P_r y P_s	40
4.10.	Relación entre M_m y θ_m	41
4.11.	Relación entre M_n y θ_m	42
5.1.	Clusters encontrados en Scopus	50
8.1.	Metodología Fase 1. Restricciones de Desplazamiento	59
8.2.	Metodología Fase 2. Optimización	60
8.3.	Metodología Fase 3. Análisis probabilístico	61
9.1.	Elementos Portico de 3 Pisos	62
9.2.	Elementos Portico de 6 Pisos	67
9.3.	Elementos Portico de 9 Pisos	70
10.1.	Acople del algoritmo DEA al problema	75
10.2.	Acople del algoritmo DEA al problema	76
11.1.	Comparación gasto de GWP de concreto Modificado optimo con Con- creto convencional	81
11.2.	Frecuencia Modulos de elasticidad y gasto de GWP Concretos Optimos	83
11.3.	Comparación gasto de GWP concreto optimo con concreto modificados	84
11.4.	Comparación Modulo de elasticidad y GWP	84

Índice de cuadros

4.1. Poblaciones	23
4.2. Enjambres	27
9.1. Sección transversal Portico de 3 Pisos	63
9.2. Modulo de Elasticidad y Resistencia a la Compresión	63
9.3. Cargas de la estructura	63
9.4. Fuerzas Horizontales Portico de 3 Pisos	66
9.5. Sección transversal Portico de 6 Pisos	67
9.6. Fuerzas Horizontales Portico de 6 Pisos	69
9.7. Sección transversal Portico de 9 Pisos	71
9.8. Fuerzas Horizontales Pórtico de 9 Pisos	72
10.1. Gasto de GWP de cada concreto modificado fuente	74
11.1. Módulos de elasticidad óptimos y gasto de GWP del pórtico de 3 pisos	78
11.2. Modulos de elasticidad optimos y gasto de GWP del portido de 6 Pisos	79
11.3. Modulos de elasticidad optimos y gasto de GWP del portido de 9 Pisos	80
11.4. Consolidado Modulos de Elasticidad Optimos	82
12.1. Distribución normal Prueba Shapiro-Wilks	87
12.2. Distribución Normal Prueba de Kolmogorov-Smirnov	88
12.3. Distribución LogNormal Prueba de Kolmogorov-Smirnov	90
12.4. Distribución Gamma Prueba de Kolmogorov-Smirnov	91
12.5. Distribución Beta Prueba de Kolmogorov-Smirnov	92

Considerando el acuerdo 213 del año 2015 de la Universidad Católica de Colombia y las líneas de investigación aprobadas por la Universidad se establece que:

Alternativa: trabajo de investigación.

Línea de investigación: gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades.

Eje temático: estructuras de concreto y medio ambiente.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la industria de la construcción, siendo fundamental para dar forma al mundo como se ve hoy, sin embargo, la fabricación del cemento, su componente principal es uno de los mayores emisores de CO_2 en el mundo produciendo anualmente alrededor de cuatro mil millones de toneladas métricas de cemento, lo que equivale al 8% de emisiones globales de CO_2 [2]. Este número ha causado preocupación en las entidades encargadas de regular el cuidado del medio ambiente, buscando que las industrias cementeras contribuyan a un cambio y logren reducir para el año 2030 estas emisiones al menos en un 16% de acuerdo con lo pactado en la reunión realizada por la ONU referente al cambio climático respecto al acuerdo de París [3].

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, en los últimos años se han presentado diferentes investigaciones enfocadas a la reducción de emisores contaminantes en el concreto por medio de la búsqueda de la forma ideal de reemplazar los materiales tradicionales por materiales más amigables ambientalmente. Por ejemplo, [1] propone el uso de materiales alternativos como residuos de demolición de construcción (áridos reciclados finos y áridos reciclados gruesos) y cenizas volantes (materiales cementosos), esta investigación da a comprender la relación entre el comportamiento mecánico, el porcentaje de agregados reciclados y el impacto ambiental que genera. De igual manera, [4] demuestra que el uso de fibras de botellas PET como agregado reciclado en el concreto mejora las propiedades mecánicas del concreto en términos de flexión, compresión y tracción.

A partir de esto, en el siguiente documento se pretende identificar cuáles son las alternativas de concretos modificados que aplicados a pórticos resistentes a momento minimizaría el Potencial de Calentamiento Global (GWP). Esto se realizó partiendo de la toma de datos de tres pórticos sujetos a fuerzas horizontales sísmicas en cada uno de los pisos y considerando restricciones de desplazamiento máximo. Por otro lado, se tuvieron en cuenta las magnitudes de GWP y módulo de elasticidad para los concretos modificados que fueron seleccionados de la literatura, los cuales fueron objeto de estudio a través de procesos de optimización con algoritmos de evolución computacional.

Capítulo 2

ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

En el siguiente capítulo se realizó un recorrido a través de una línea de tiempo de los avances que han tenido las investigaciones realizadas previamente en el campo de optimización relacionado a la construcción sostenible en estructuras de concreto.

2.1. ANTECEDENTES

Año 1997

[5] Fue uno de los primeros trabajos publicados en donde se habla de la evolución que han tenido las técnicas de optimización estructural a lo largo de la historia, haciendo referencia a dos métodos que pueden llevarse a cabo; el primero, es directo donde se implican condiciones de optimización en las cuales se involucran aspectos importantes como densidad uniforme de tensión o deformación, esto con el fin de lograr minimizar o maximizar el peso de una estructura. El segundo método que es indirecto hace referencia a la optimización matemática que tiene como fin conseguir un balance económico integral que permita minimizar los costos y maximizar la utilidad en varias condiciones de carga, teniendo en cuenta restricciones respecto a seguridad y factibilidad de servicio. Paulatinamente se han desarrollado sistemas de optimización que han permitido la automatización de diseños interactivos cada vez más sofisticados basados en técnicas de búsqueda inteligente.

Por otro lado, [6] hace referencia a los métodos computacionales basados en la actividad del cerebro humano conocidos como algoritmos genéticos, donde han logrado diversos avances en la ingeniería y solución óptima a necesidades. Este algoritmo es un método que establece un rango amplio de combinación en búsqueda de un diseño óptimo con una metodología que considera la forma y organización del algoritmo sí se aplica a gran escala.

Estos algoritmos basados en comportamientos de la naturaleza han resultado útiles para resolver problemas del campo de la ingeniería, ya que resultan adecuados para su aplicación en el área de optimización de diseños estructurales. Por otro lado, la forma de aplicación del método es evolutivo, donde se pone en funcionamiento un grupo de datos codificados y pruebas probabilísticas, con el fin de que los sujetos relativamente competentes se combinen y puedan producir nuevos individuos.

La optimización en el diseño estructural normalmente se puede llegar a ver afectada por un número de limitaciones o restricciones que hacen referencia a la resistencia máxima del material, rigidez máxima, forma y geometría entre otras, la aplicación de estas restricciones puede llegar a ser el área más complicada de tratar en la búsqueda de un mejoramiento u optimización.

Año 2004

Se realizó el estudio de la aplicación del concreto reciclado como agregado del concreto estándar, con el fin de obtener una mezcla optima de concreto en función de la resistencia a la compresión y al asentamiento. Se propone un enfoque sistemático y estadístico a partir del análisis de los datos experimentales que se basan en el uso de una matriz ortogonal, el análisis de varianza (ANOVA) y la prueba con F estadística. Por otro lado, se utilizó el método de calidad de Taguchi para reducir el número de pruebas.

Basado en la metodología de Taguchi, se obtuvieron 16 análisis experimentales en las cuales se tuvieron en cuenta cinco factores de control; a partir de las interacciones del análisis de varianza se muestra la mejor combinación para la mezcla de concreto, que presento los siguientes valores: relación agua/cemento de 0.5, relación de volumen de agregado grueso reciclado de 42.0 %, arena de rio 100 % natural y 0 % de ladrillo triturado; Esta mezcla óptima presento a los 28 días valores de asentamiento de 180mm y resistencia a la compresión de 30,17MPa, valores que son aceptables en la mayoría de estructuras de concreto [7].

Año 2005

En este año se inicia con los procesos de optimización en estructuras considerando agentes ambientales, con un estudio en donde se expone el impacto que tiene los edificios en problemas ambientales relacionados con la energía y el cambio climático. En Canadá, los edificios institucionales, residenciales y comerciales eran responsables del 30 % del uso de energía, es decir un 29 % de emisiones de CO_2 . A partir de esto, [8] presenta un estudio de caso de un edificio de oficinas de un solo piso ubicado en Montreal, al cual se le realizó un modelo de optimización y un programa de simulación de energía para determinar soluciones óptimas con el fin de conseguir una construcción ecológica y económicamente rentable. Para esto, se utilizó un modelo de optimización multiobjetivo que busca determinar un conjunto de soluciones a partir del diagrama de Pareto utilizando un algoritmo genético, el cual opera utilizando variables discretas y continuas en toda una población de soluciones. Para esto se aplicó la metodología de análisis del ciclo de vida evaluando alternativas de diseño enfocadas a criterios ambientales y económicos en todas las fases de su ciclo de vida, desde la compra de material hasta la decisión final; los impactos ambientales del ciclo de vida se evalúan en términos de consumo de energía acumulativa ampliada, con el fin de que aborde los problemas tanto de valoración como de caracterización del agotamiento de los recursos naturales.

Debido al proceso aleatorio del algoritmo genético, cada ejecución del programa tardó aproximadamente 30 horas y el programa se ejecutó tres veces por escenario. El estudio de caso demostró que la estructura del edificio genera un gran impacto en el desempeño ambiental, pues si la fuente de energía eléctrica cambia a hidroeléctrica, los impactos ambientales del ciclo de vida disminuirían un 65 %.

Año 2008

Como se sabe, la construcción es una de las actividades que más aporta contaminantes al medio ambiente. Sin embargo [9] argumenta como la industria cementera ha aportado de forma positiva al cuidado del medio ambiente y la disminución de emisiones de CO_2 en la producción del cemento, utilizando materiales alternativos que permitan reducir el uso del Clinker en la producción de cemento tradicional.

También, se habla de otras formas de aumentar la tasa de absorción de CO_2 haciendo buen uso del concreto reciclado y aprovechando la concentración térmica generada para implementar soluciones energéticamente optimizables para la calefacción y refrigeración de edificaciones residenciales y corporativas. De manera que, la materia prima desechada por otras industrias es cada vez más utilizada para sustituir los materiales habituales que se utilizan para la producción de Clinker que a su vez se utiliza en la elaboración del cemento portland, dentro de dichos materiales se destacan la fundición de arenas, cenizas volantes y cenizas de fondo de centrales eléctricas de carbón, catalizadores gastados y arcillas filtrantes. Además, los materiales que reaccionan con el hidróxido de calcio son generalmente conocidos con el nombre de materiales cementosos suplementarios, que se componen de cenizas volantes, escorias granuladas de altos hornos, puzolanas y también de sílice, pero en una menor cantidad.

Año 2009

Con el fin de mitigar las emisiones de CO_2 de futuros diseños estructurales, [10] propone una metodología para optimizar el diseño de pórticos de concreto armado mediante un algoritmo de recocido simulado (annealing simulation “AS”), donde se tienen en cuenta como sus funciones objetivo la optimización de emisiones de CO_2 y el costo de los pórticos de concreto armado, los cuales se quieren minimizar simultáneamente. En este estudio se realiza la evaluación y verificación informática de todos los estados límites de los seis pórticos trabajados.

El análisis estadístico completo para 9 ejecuciones toma 45 horas y está limitado hasta 10 pisos; muestra como resultado las dimensiones de los pórticos optimizados, el porcentaje de emisiones totales de CO_2 (acero de refuerzo 56 %, concreto 30 % y encofrado 13 %), además de los costos que generaría. El objetivo primordial del estudio es minimizar tanto el CO_2 como el costo de la estructura. Los resultados revelaron un máximo de 2.77 % de emisiones de CO_2 (3.38 % de emisión sin involucrar el algoritmo de optimización); Esto lleva a la conclusión de que tanto los costos

como las emisiones de CO_2 pueden “ir de la mano” en procesos de optimización.

Año 2011

Se evidencia en un estudio realizado que el uso de materiales sostenibles en el concreto, sobre todo cenizas volantes, presentaba obstáculos respecto al incremento de tiempos de fraguado y resistencias reducidas en edades tempranas. Es por esto que [11] presentó un nuevo enfoque de optimización de los tamaños de partículas de cemento y cenizas volantes, donde se trabajó con una mezcla de cemento más fino y una ceniza más gruesa, con el fin de lograr un producto superior y el rendimiento deseado.

Las variables que se tomaron en cuenta son: porcentaje de proporción volumétrica de cenizas volantes, tamaño de partícula del cemento y tamaño de partícula de cenizas volantes. Estos tamaños de partículas fueron medidos utilizando una técnica de difracción laser. Se realizaron pruebas de resistencia a 19 muestras, evaluadas en 6 edades y con diferente porcentaje de cenizas volantes; de las cuales dio como resultado que las mezclas con un 20 % de cenizas volantes, desarrollaron una resistencia a la compresión mayor que la mezcla de control, y las muestras con un 35 % de cenizas volantes se igualaron o en algunos casos se acercaron. Para finalizar, a cada edad de prueba se le realizó el análisis de regresión lineal con el fin de elegir la relación que mejor se ajusta a la resistencia de compresión.

Por otro lado, [12] describen como por medio de la energía incorporada se pueden llevar a cabo la construcción de estructuras de concreto más sostenible y eficientes, teniendo en cuenta la evaluación del ciclo de vida de los materiales como base fundamental para el diseño que elaboran arquitectos e ingenieros estructurales.

En consecuencia, presentan un modelo de estudio a partir de la energía incorporada en los edificios la cuál puede utilizarse para reducir las emisiones CO_2 , para dicho estudio se usa como base la sección transversal de una viga y se tienen en cuenta variables de diseño como el ancho de la viga, altura de la viga, área de refuerzo longitudinal, área total de refuerzo cortante y espaciamiento del refuerzo. Como resultado de este estudio de optimización se obtiene que la energía incorporada en el miembro del diseño estructural disminuye en un 10 % después de aplicar la técnica, esta reducción depende especialmente de la relación entre el costo y el refuerzo de acero del concreto.

Año 2013

Con el objetivo de minimizar el costo total producido por emisiones de CO_2 asociadas a la construcción de pórticos en concreto, [13] aplica un algoritmo de optimización llamado Big Bang-Big Crunch (BB-BC), para el diseño automático de concreto armado. Este método de optimización fue seleccionado ya que con anterioridad se demostró que supero a los algoritmos clásicos, híbridos y genéticos en muchas funciones de optimización.

A partir de esto, se presentaron varios diseños y características de pórticos de concreto armado que se comparan con diseños realizados con un algoritmo genético o con una simulación de recocido (AS). Como resultado de los diseños del algoritmo (BB-BC) se seleccionaron diseños de bajo costo de pórticos con cuatro o seis pisos y dos bahías que presentaron reducciones en las emisiones de CO_2 y un decremento del 5.2 % del costo de la estructura.

De igual manera, [14] busca la reducción de emisiones de CO_2 producidas por el cemento, a partir de la reducción del contenido de agua, el uso de cemento altamente reactivos y la sustitución de materias primas secundarias como la escoria de alto horno y la ceniza volante. En los ensayos realizados a estos tipos de concreto, se estudiaron las propiedades mecánicas, de trabajabilidad y resistencia del concreto.

Como resultado se obtuvo una reducción de casi el 35 % en el potencial de calentamiento global del concreto que presenta reducción de agua y cemento, así mismo se obtuvo una reducción del 60 % en el impacto ambiental, de este mismo concreto con escoria de alto horno.

Año 2014

[15] Habla de la optimización de costos ambientales y monetarios del consumo de materiales en las etapas de extracción, fabricación y transporte de un diseño de columnas rectangulares de concreto armado sometido a cargas uniaxiales de compresión y de flexión. Para este proceso de optimización se utilizó un algoritmo de búsqueda de armonía (Harmony Search “HS”) que tiene un enfoque metaheurístico semejante al proceso, al cual se adaptó con la metodología del ciclo de vida de los materiales. Las variables a utilizar fueron los tamaños de la sección y la resistencia del concreto, por otro lado, se verificaron los estados de servicio límite y últimos teniendo en cuenta la norma brasileña ABNT NBR 6118/07. Se concluyó es que la optimización de los costos monetarios está relacionada con la disminución de los costos ambientales analizados (emisiones de CO_2 , GWP y consumo de energía).

2.2. JUSTIFICACIÓN

Esta investigación desea analizar la mezcla de concreto modificado con agregado reciclado y cenizas volantes que contribuya a minimizar el GWP en comparación con el producido por el concreto convencional, visibilizando la relación estrecha entre el uso de recursos alternativos, el comportamiento mecánico, y el impacto ambiental en una estructura de concreto modificado.

La empresa CarbonCure Technologies, con sede en Nueva Escocia, inyecta durante la mezcla, dióxido de carbono líquido en el concreto, para mantener fuera del aire los gases de efecto invernadero, fortaleciendo el concreto y reduciendo la cantidad de cemento necesario, esta tecnología se ha instalado en 225 plantas de Estados Unidos [16]. Por otro lado [17] presenta un estudio que consiste en la elaboración

de concreto ecológico para la construcción de viviendas de bajo costo, por medio de la reutilización de diversos materiales como, plástico PET , papel y bagazo de caña de azúcar. En relación a la construcción sostenible, [18] realizó un experimento para la fabricación de una vivienda con bloques de suelo cemento, para disminuir significativamente el impacto ambiental, las emisiones de CO_2 y de combustibles fósiles. Una comparación de la huella de carbono generada por los bloques de suelo cemento y ladrillo convencional demuestra que las emisiones de CO_2 emitidas por estos bloques 238 veces menores que las emitidas por un ladrillo cerámico tradicional. Por otro lado, la empresa BioMason [19], utiliza bacterias para fabricar ladrillos de bio-concreto, este proceso se realiza al aire libre y no se necesitan combustibles fósiles o calcinación, principales fuentes en la industria del concreto de emisiones de CO_2 .

Las empresas mencionadas en los párrafos anteriores muestran el interés de la industria por considerar técnicas de fabricación de materiales y elementos de construcción que reduzcan el impacto ambiental en su producción. La importancia de esta investigación radica en la selección de los concretos modificados que minimicen el impacto ambiental en su fabricación, con el fin de que estos puedan ser objeto de estudio para diferentes aplicaciones en el campo de la construcción.

A partir de esto, se espera contribuir con esta investigación a aumentar el estado del conocimiento respecto a los concretos modificados que se pueden utilizar en la construcción, que siguiendo lineamientos normativos representen un beneficio en el impacto ambiental de la construcción de una estructura de concreto.

Capítulo 3

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

A pesar de que el ser humano ha tenido un desarrollo constante a nivel de infraestructura a través de los años, se ha evidenciado que no posee la capacidad de adaptarse a su entorno, pues siempre ha colocado como prioridad sus necesidades y anhelo acelerado de desarrollo por encima de las necesidades generales del entorno causando como resultado un desequilibrio entre aspectos naturales y antrópicos como por ejemplo el aumento desmesurado de los contaminantes.

En Colombia, a pesar de que en los últimos años se ha evidenciado un avance en el campo de la sostenibilidad específicamente en la construcción, aún se presentan barreras que no permiten la aplicación de diversas técnicas estudiadas en la actualidad, probablemente causada por factores políticos, económicos y sociales. En consideración a esto, [20] expone la falta de fortalecimiento de políticas implantadas por las instituciones para fomentar el uso de criterios sostenibles en la construcción Colombiana. De igual manera [21] habla de la dificultad que presentan las empresas del sector al implementar nuevas prácticas de sostenibilidad a causa del desconocimiento del uso de los recursos renovables Colombianos y de las ventajas técnicas y económicas de estas prácticas. Por otro lado, se evidencia la falta de apoyo político a iniciativas de construcción sostenible además de la desconfianza de los colombianos a experimentar otras alternativas.

El concreto es el material de construcción más usado en el mundo, actualmente se produce 4000 millones de toneladas de cemento al año y se espera que en los próximos 30 años esta cifra aumente a 5000 millones de toneladas [19]. A partir de estos valores el grupo de expertos Chatham House establecen que el concreto produce aproximadamente 2200 millones de toneladas de CO_2 correspondientes al 8% de las emisiones del mundo. Para evidenciar esto se toma como ejemplo la industria del cemento como un país, el cual estaría situado en tercer lugar detrás de China y Estados Unidos en la lista de emisores más grandes del mundo [3].

Las emisiones que produce el concreto deben poseer un enfoque en todo el ciclo de vida de este material, donde hay que tener en cuenta su producción, transporte, fabricación, montaje, operación, demolición entre otros factores, permitiendo considerar la energía consumida del concreto durante todo su proceso. La energía

incorporada consumida durante el ciclo de vida del concreto se estima en alrededor del 40-50 % de la energía total [22].

A partir de lo anteriormente nombrado se planteó la siguiente pregunta:

¿Cuáles son los tipos de concretos modificados que utilizados en pórticos bidimensionales resistentes a momento que minimizarían la cantidad de Potencial de Calentamiento Global (GWP)?

Capítulo 4

MARCO DE REFERENCIA

A continuación, se presenta en primera instancia la teoría de las técnicas de optimización (modelos de evolución computacional) que se utilizaron y los procesos necesarios para desarrollarlos de forma adecuada, así mismo se presenta la teoría de análisis matricial en pórticos 2D y por último se habla acerca del teorema de intervalos de confianza y de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov – Smirnov y Shapiro - Wilk con los que se evaluaron los resultados obtenidos en esta investigación.

4.1. MARCO TEÓRICO

A continuación, se presenta la descripción del algoritmo de evolución diferencial (Differential Evolution Algorithm “DEA”) y el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (Particle Swarm Optimization “PSO”).

La optimización se basa en modelos que permiten determinar y seleccionar la mejor alternativa posible de un problema planteado que busca un resultado de acuerdo a una meta propuesta. Estos problemas están compuestos generalmente por tres factores importantes: función objetivo inicial, variables y restricciones.

4.1.1. Algoritmo de Evolución Diferencial

Este algoritmo se basa es un método de búsqueda paralelo directo que utiliza vectores de parámetros no lineales dimensionales como población para cada generación y se basa en la teoría de selección natural de Darwin [23].

Paso 1. Generar población inicial (x)

La generación de la población inicial se realiza de manera aleatoria teniendo en cuenta que se debe cubrir todo el espacio de parámetros de una forma uniforme [23]. Para esto se debe tener en cuenta que la población es el conjunto de elementos de toda la estructura; y el individuo son los elementos de la estructura que pertenece a la población.

Población	Individuos
1	$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$
2	$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$
\vdots	$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$
NP	$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$

Cuadro 4.1: Poblaciones

En donde NP es el número de poblaciones.

La siguiente matriz presenta la población inicial que representara todos los individuos de las poblaciones a trabajar.

$$x_{i,j} = \begin{pmatrix} x_{i,j} & x_{i,j+1} & x_{i,j+2} & \dots & x_{i,N} \\ x_{i+1,j} & x_{i+1,j+1} & x_{i+1,j+2} & \dots & x_{i+1,N} \\ x_{i+2,j} & x_{i+2,j+1} & x_{i+2,j+2} & \dots & x_{i+2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n,j} & x_{n,j+1} & x_{n,j+2} & \dots & x_{n,N} \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

Donde:

$X_{i,j}$: Población inicial

i : Fila

j : Columna

N : número de individuos

n : Numero de la población

A continuación, se comprueba a partir de las Ecuaciones 4.2 y 4.3 que todos los valores generados se encuentren dentro del rango establecido. Dentro de los procesos de optimización todas las variables deben tener un límite máximo y mínimo.

$$Si \ x_{ij} > V_{max} \rightarrow x_{ij} = V_{max} \quad (4.2)$$

$$Si \ x_{ij} < V_{min} \rightarrow x_{ij} = V_{min} \quad (4.3)$$

Donde:

V_{max} : Valor máximo que puede tomar un individuo

V_{min} : Valor mínimo que puede tomar un individuo

A partir de esto, se efectúa un análisis estructural por medio de la evaluación del valor de forma de cada población y se analiza el cumplimiento de restricciones.

En dado caso que algún individuo no cumpla alguna de las restricciones, se procede a aplicar la Ecuación 4.4 que es una penalización a las variables, en donde se aumenta intencionalmente el costo de la variable a optimizar con el fin de inducir un peor resultado y asegurar que dicho resultado no pueda generar descendencia.

$$W_{penal} = W \left(1 + \alpha \frac{NNSR}{NTR} \right)^\beta \quad (4.4)$$

Donde:

W_{penal} : Variable a optimizar penalizada.

W : Variable a optimizar.

α : 6

β : 3

$NNSR$: Número de restricciones no satisfechas.

NTR : Número total de restricciones.

Tanto α como β son variables que se ajustan en el proceso de análisis de los resultados. En la literatura se encuentran sugerencias iniciales de valores 6 y 3 para α y β respectivamente.

Paso 2. Generar población con mutación (v)

Para toda la población inicial se generará una población mutada con índices aleatorios, realizado a partir de un operador de mutación dado en la Ecuación 4.5.

$$v_i = x_i^{best} + F(x_{r1} + x_{r2}) + F(x_{r3} - x_{r4}) \quad (4.5)$$

Donde:

x_i^{best} : $\min(f(x_i))$, valor de forma mínimo de la función objetivo evaluada con la población inicial.

F : factor de mutación. La literatura recomienda utilizar el valor de 0.5.

$x_{r1}, x_{r2}, x_{r3}, x_{r4}$: Números aleatorios enteros que determinan la selección de población en el operador de mutación.

Al aplicar este operador se termina obteniendo una nueva población, en este caso la población mutada.

$$v_{i,j} = \begin{pmatrix} v_{i,j} & v_{i,j+1} & v_{i,j+2} & \dots & v_{i,N} \\ v_{i+1,j} & v_{i+1,j+1} & v_{i+1,j+2} & \dots & v_{i+1,N} \\ v_{i+2,j} & v_{i+2,j+1} & v_{i+2,j+2} & \dots & v_{i+2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{n,j} & v_{n,j+1} & v_{n,j+2} & \dots & v_{n,N} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Donde:

$V_{i,j}$: Población mutada
 N : número de individuos
 n : Numero de la población

A continuación, se comprueban a partir de las ecuaciones 4.2 y 4.3 que todos los valores generados se encuentren dentro del rango establecido.

Paso 3. Generar la población combinada (u)

Se realizará la combinación de la población inicial y la población mutada, a partir de Ecuación 4.7

$$u_{i,j} \begin{cases} v_{i,j} & \text{Si } (\text{aleatorio}) \leq CR \text{ o } j = j_{\text{aleatorio}} \\ x_{i,j} & \text{De otra manera} \end{cases} \quad (4.7)$$

Donde:

CR : Factor de cruce. La literatura recomienda un valor determinista de 0.8

$J_{\text{aleatorio}}$: Numero aleatorio entre 1 y el número de individuos de la población

En la Figura 4.1 se podrá visualizar el diagrama de flujo el cual explica más a fondo el proceso para la generación de la población combinada.

Al aplicar lo anterior se obtiene una nueva población combinada que se podrá ver en siguiente matriz.

$$u_{i,j} = \begin{pmatrix} u_{i,j} & u_{i,j+1} & u_{i,j+2} & \dots & u_{i,N} \\ u_{i+1,j} & u_{i+1,j+1} & u_{i+1,j+2} & \dots & u_{i+1,N} \\ u_{i+2,j} & u_{i+2,j+1} & u_{i+2,j+2} & \dots & u_{i+2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{n,j} & u_{n,j+1} & u_{n,j+2} & \dots & u_{n,N} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

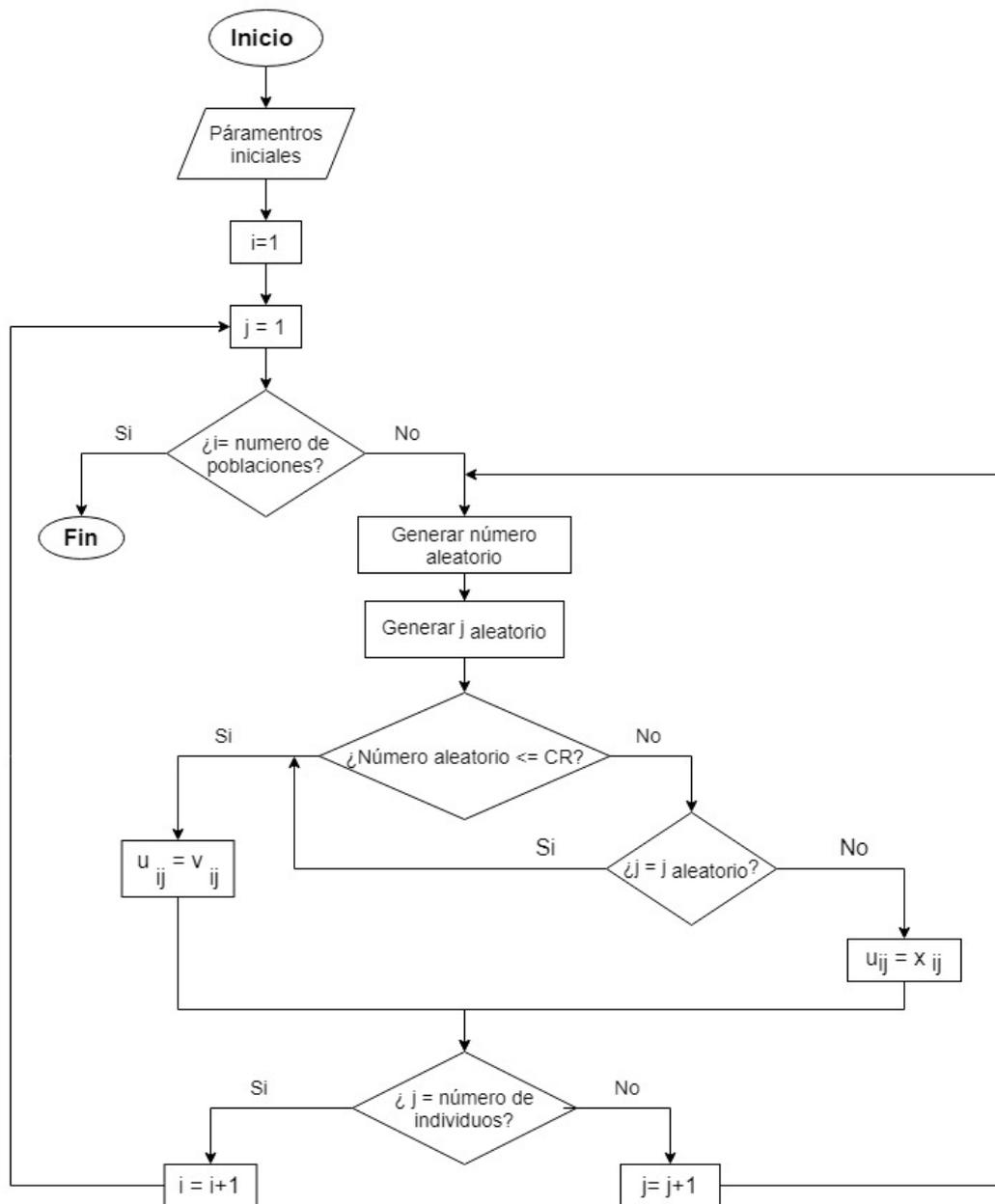
Donde:

$u_{i,j}$: Población inicial

A partir de esto, se efectúa un análisis estructural por medio de la evaluación del valor de forma para saber si la población combinada en algún individuo incumple las restricciones.

En dado caso de que no se cumplan alguna de las restricciones se procede a aplica una penalización (Ecuación 4.4) a las variables. Se debe tener en cuenta que se trabajó con valores de $\alpha = 6$ y $\beta = 3$, pero en el caso de que se presenten problemas de convergencia se tienen que variar estos valores a criterio del usuario.

Figura 4.1: Diagrama de flujo generación de población combinada



Fuente: propia

Paso 4. Proceso iterativo

Para finalizar, se selecciona el mejor valor mediante una comparación entre el valor de forma de la función objetivo de la población inicial y el de la población combinada. Esto dará como resultado una nueva población objetivo a la cual se le aplicaran de nuevo los pasos 1, 2 y 3; este proceso se realizará hasta que se cumpla con el número máximo de generaciones y en su última repetición dará el resultado de cual población tiene el mejor comportamiento. Este proceso fue adaptado de [23].

4.1.2. Optimización por enjambre de partículas

PSO intenta simular un modelo social inspirado en el comportamiento de los enjambres de especies como las bandadas de aves o bancos de peces relacionado con la computación evolutiva [24]. Esta técnica de optimización se inicia con una solución de poblaciones aleatorias a las cuales se les asignará una velocidad también aleatoria para seleccionar soluciones potenciales [25].

Paso 1. Generar la posición del enjambre inicial (P)

La generación del enjambre inicial se realiza de manera aleatoria. Para esto se debe tener en cuenta que los enjambres corresponden al conjunto de elementos de toda la estructura; y las partículas son los elementos de la estructura que pertenece al enjambre.

En la Tabla 4.2 se podrá evidenciar como se genera aleatoriamente valores para cada individuo en todas las poblaciones.

Cuadro 4.2: Enjambres

Enjambre	Partícula
1	$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$
2	$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$
\vdots	$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$
NP	$x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n$

Donde:

NE : Número de enjambres.

La siguiente matriz presenta el enjambre inicial y todas las partículas de este.

$$p_{i,j} = \begin{pmatrix} p_{i,j} & p_{i,j+1} & p_{i,j+2} & \dots & p_{i,N} \\ p_{i+1,j} & p_{i+1,j+1} & p_{i+1,j+2} & \dots & p_{i+1,N} \\ p_{i+2,j} & p_{i+2,j+1} & p_{i+2,j+2} & \dots & p_{i+2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n,j} & p_{n,j+1} & p_{n,j+2} & \dots & p_{n,N} \end{pmatrix} \quad (4.9)$$

Donde:

$P_{i,j}$: Enjambre inicial

Se comprueban que todos los valores generados se encuentren dentro del rango establecido.

$$\text{Si } p_{ij} V_{max} \rightarrow x_{ij} = V_{max} \quad (4.10)$$

$$\text{Si } p_{ij} V_{min} \rightarrow x_{ij} = V_{min} \quad (4.11)$$

A partir de esto, se efectúa un análisis estructural por medio de la evaluación del valor de forma de cada enjambre y se analiza el cumplimiento de las restricciones.

Paso 2. Identificar el líder del enjambre (g)

A partir de los datos del enjambre inicial se selecciona el enjambre con el menor valor, esto se representa en la Ecuación 4.12.

$$g_i = \min(f(p_i)) \quad (4.12)$$

Paso 3. Generar la velocidad de cada partícula y calcular la nueva posición

Se le dará una velocidad a cada partícula por medio de tres criterios evidenciados en la Ecuación 4.13.

$$V_i = [WV_i^{g-1}] + [C_1 r_1 (p_{best} - p_i)] + [C_2 r_1 (g_i - p_i)] \quad (4.13)$$

Donde:

r_1 y r_2 : Valores aleatorios.

W : Variable a utilizar (Ecuación 4.14).

$$W = \left(\frac{W_{min} - W_{max}}{MNG} \right) (Iter - 1) + W_{max} \quad (4.14)$$

Donde:

$Iter$: Número de iteraciones MNG : Número máximo de la generación.

W_{min} : 0.4, este valor es sugerido por la literatura.

W_{max} : 0.9, este valor es sugerido por la literatura.

Por otro el cálculo de C_1 se presenta en la Ecuación 4.15.

$$C_1 = \left(\frac{C_{1min} - C_{1max}}{NMG} \right) (Iter) + C_{1max} \quad (4.15)$$

Donde:

$$C_{1min}: 0.5$$

$$C_{1max}: 2.5$$

De igual manera, el cálculo de C_2 se presenta en la Ecuación 4.16.

$$C_2 = \left(\frac{C_{2min} - C_{2max}}{NMG} \right) (Iter) + C_{2max} \quad (4.16)$$

Estos criterios se utilizan como vectores y la operación de la generación de velocidad se realiza como una suma de tres vectores (vector 1: criterio de exploración, vector 2: criterio de decisión individual, vector 3: criterio de decisión grupal).

Para calcular la nueva posición de las partículas, se realiza la suma de las velocidades a cada una de las partículas del enjambre Ecuación 4.17.

$$p_i = p_i + V_i \quad (4.17)$$

A partir de esto, se efectúa un análisis estructural por medio de la evaluación del valor de forma de cada enjambre y se analiza el cumplimiento de las restricciones. En dado caso de que no se cumplan alguna de las restricciones se procede a aplica una penalización a las variables a partir de la ecuación 4.4.

Paso 4. Combinar con la nueva generación de partículas

En este punto se tienen dos conjuntos de enjambre: el enjambre inicial y el enjambre después de aplicarle la velocidad, se realiza una comparación de las funciones de forma de la función objetivo de las dos poblaciones para conocer cuál es la mejor, a partir de esto se forma un nuevo conjunto de enjambre que se llamara $f(P_{ibest})$ con las mejores poblaciones.

Paso 5. Proceso iterativo

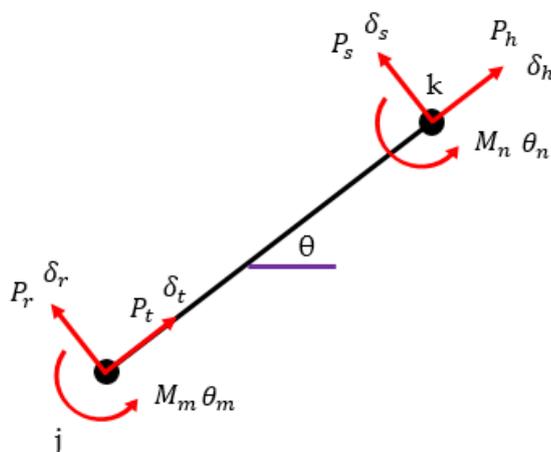
Ya con el nuevo enjambre, se realiza de nuevo los pasos 2, 3 y 4; este proceso se realizará hasta el número máximo de generaciones definido por el usuario y en su última repetición se dará el resultado del enjambre que tiene el mejor comportamiento.

Este proceso fue adaptado de [24] y [25].

4.1.3. Pórticos 2D

A continuación, se muestra el desarrollo del análisis matricial para estructuras tipo pórtico, estas se analizan teniendo en cuenta los grados de libertad que se tenga en cada nudo de una barra. Normalmente se presentan tres grados de libertad: dos traslacionales en dirección X y en dirección Y y uno rotacional alrededor del eje Z, cada uno de estos grados cuenta con una fuerza que genera un desplazamiento y el momento que genera rotación (ver Figura 4.2). En cada sección del pórtico siempre se analiza un punto inicial y uno final.

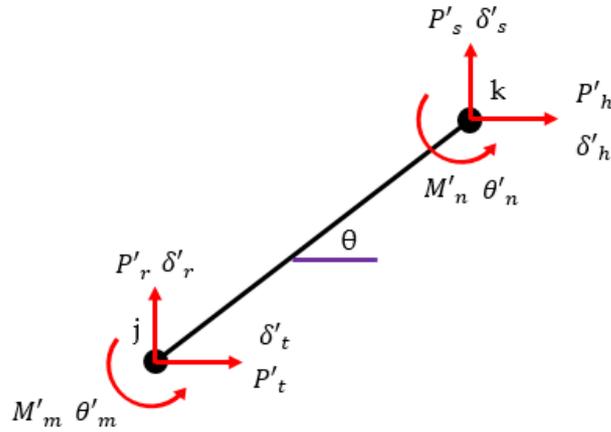
Figura 4.2: Fuerzas iniciales en coordenadas locales



Fuente: propia

Es necesario transformar cada uno de los elementos de coordenadas locales a globales con el fin de que todos los elementos de la estructura conduzcan a una misma dirección, esto se podrá ver en la Figura 4.3.

Figura 4.3: Fuerzas iniciales en coordenadas globales



Fuente: propia

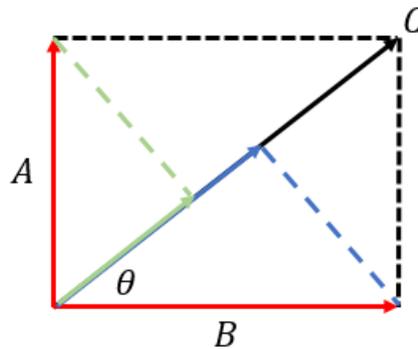
Para comenzar se debe realizar el cálculo de la posición en Y y X de la barra, mediante la Ecuación 4.22 y la Ecuación 4.23.

$$C_x = \cos(\theta) = \frac{k_x - j_x}{L} \quad (4.18)$$

$$C_y = \sin(\theta) = \frac{k_y - j_y}{L} \quad (4.19)$$

Esto parte de la teoría de que el vector C de la Figura 4.7 se puede calcular en función de A y B a partir del teorema de Pitágoras como muestra la Ecuación 4.20.

Figura 4.4: Vectores coordenadas locales



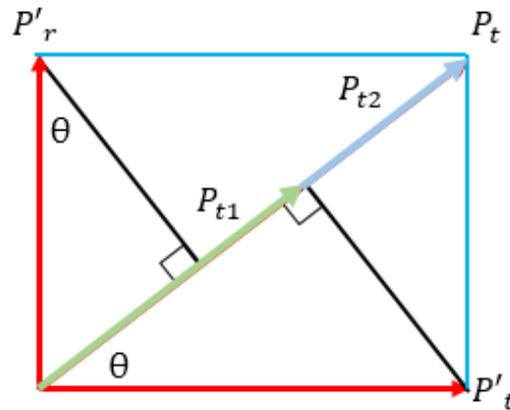
Fuente: propia

$$C = A \sin(\theta) + B \cos(\theta) \quad (4.20)$$

Transformación de fuerzas (Pt, Pr, Ps Y Ph) a coordenadas globales

Se da inicio a la transformación de coordenadas locales en globales a partir de descomposición de la fuerza Pt Figura 4.5 en P'_r y P'_t .

Figura 4.5: Descomposición del vector P_t



Fuente: propia

El valor de P_t se calcula a partir de la Ecuación 4.21.

$$P_t = P'_t C_x + P'_r C_y \quad (4.21)$$

Los valores de C_x hacen referencia al $\text{Cos}(\theta)$ y C_y hace referencia al $\text{Sen}(\theta)$, estos valores se calculan en la ecuación 4.22 y Ecuación 4.23 respectivamente.

$$C_x = \frac{P_{t1}}{P'_t} \quad (4.22)$$

$$C_y = \frac{P_{t2}}{P'_r} \quad (4.23)$$

En la ecuación 4.24 se evidencia la sustitución de las variables de C_x y C_y en el cálculo de P_t de la Ecuación 4.21.

$$P_t = P'_t \frac{P_{t1}}{P'_t} + P'_r \frac{P_{t2}}{P'_r} \quad (4.24)$$

Se realiza la cancelación de los valores de P'_t en la ecuación 4.25

$$P_t = P_{t1} + P_{t2} \quad (4.25)$$

El procedimiento que se realizó para convertir Pt en coordenadas globales, se realizara para Pr, Ph y Ps, evidenciado sus resultados en las siguientes ecuaciones: Ecuación 4.26, Ecuación 4.27 y Ecuación 4.28 respectivamente.

$$P_r = -P'_t C_y + P'_r C_x \quad (4.26)$$

$$P_h = -P'_h C_y + P'_s C_x \quad (4.27)$$

$$P_s = -P'_h C_y + P'_s C_x \quad (4.28)$$

Transformación del Momento a coordenadas globales.

Después de analizar las fuerzas se procede transformar los momentos Mm y Mn a coordenadas globales.

$$M_m = M'_m \quad (4.29)$$

$$M_n = M'_n \quad (4.30)$$

Como se pueden ver en la Ecuación 4.29 y Ecuación 4.30 los momentos en coordenadas locales son iguales a los momentos en coordenadas globales.

En la Ecuación 4.31 se evidencian los valores de todos los elementos, fuerzas y momentos del pórtico después de ser convertidos en coordenadas globales organizados como un sistema de ecuaciones que se puede representar de forma matricial.

$$P_t = P'_t C_x + P'_r C_y \quad (4.31a)$$

$$P_r = -P'_t C_y + P'_r C_x \quad (4.31b)$$

$$M_m = M'_m \quad (4.31c)$$

$$P_h = P'_h C_x + P'_s C_y \quad (4.31d)$$

$$P_s = P'_h C_x + P'_s C_y \quad (4.31e)$$

$$M_n = M'_n \quad (4.31f)$$

Matriz de transformación T

Los sistemas de ecuaciones lineales tienen en común las variables C_x y C_y , generando la posibilidad de organizar de forma matricial las fuerzas y momentos anteriormente nombrados de la estructura, procedimiento que se puede ver en la siguiente matriz.

$$\begin{pmatrix} P_t \\ P_r \\ M_m \\ P_h \\ P_s \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_x & C_y & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -C_y & C_x & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_x & C_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -C_y & C_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P'_t \\ P'_r \\ M'_m \\ P'_h \\ P'_s \\ M'_n \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

A partir de la matriz de transformación, se puede transformar las fuerzas P en coordenadas globales o locales, esto se puede ver en la Ecuación 4.33.

$$P_i = [T]P'_i \rightarrow P'_i = [T]^T P_i \quad (4.33)$$

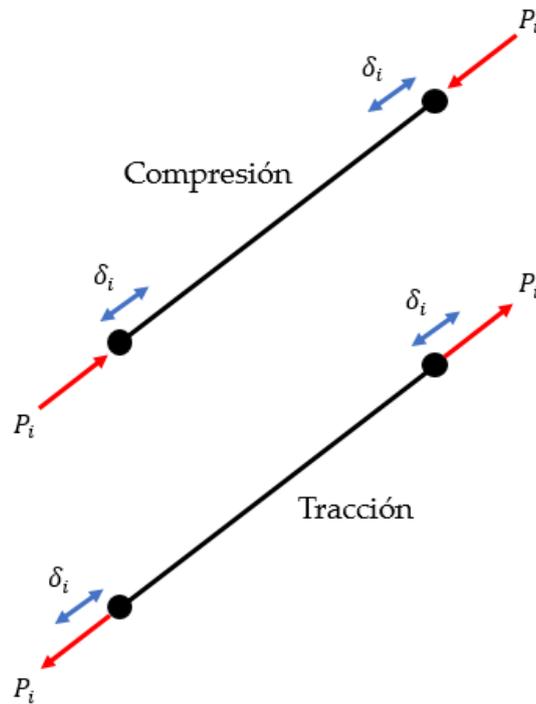
De igual manera, por medio de la matriz de transformación se puede transformar el desplazamiento δ de coordenadas locales a globales, como se puede ver en la Ecuación 4.34.

$$\delta = [T]\delta'_i \rightarrow \delta'_i = [T]^T \delta_i \quad (4.34)$$

Matriz de Rigidez - Fuerzas P_t y P_h

La rigidez parte de la definición de una fuerza que genera un desplazamiento, o un momento flector que genera un giro. Para esta matriz en primer lugar se debe tener en cuenta que las fuerzas presentadas P_i solo ocasionan deformaciones axiales las cuales se evidencian en la Figura 4.6.

Figura 4.6: Deformaciones axiales ocasionadas por P_i



Fuente: propia

Esta deformación axial y la presencia de un rango lineal implican que se puede utilizar la ley de Hooke E. para el cálculo de la ecuación 4.35 deformación.

$$\sigma_i = E\varepsilon_i \quad (4.35)$$

Donde:

σ : Esfuerzo, Ecuación 4.36.

E : Modulo de Elasticidad

ε_i : Deformación Unitaria, Ecuación 4.37

$$\sigma_i = \frac{P_i}{A} \quad (4.36)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L} \quad (4.37)$$

A partir de esto se rempazan valores del esfuerzo y la deformación unitaria en la Ecuación 4.38.

$$\frac{P_i}{A} = E \frac{\delta_i}{L} \quad (4.38)$$

En la Ecuación 4.39 se realiza el despeje de la relación $\frac{P_i}{\delta}$.

$$P_i = \frac{AE}{L} \delta_i \quad (4.39)$$

La relación $\frac{P_i}{\delta}$ es igual a la rigidez, por lo tanto se obtiene como resultado la Ecuación 4.40.

$$k = \frac{AE}{L} \quad (4.40)$$

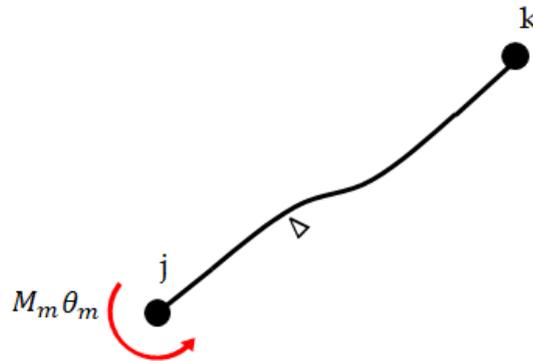
La rigidez (k) requiere de multiplicarse con un desplazamiento (δ_i) para obtener una fuerza (P) en este caso P_t y P_h , realizado de forma matricial en la siguiente matriz.

$$\begin{pmatrix} P_t \\ P_r \\ M_m \\ P_h \\ P_s \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_t \\ \delta_r \\ \theta_m \\ \delta_h \\ \delta_s \\ \theta_n \end{pmatrix} \quad (4.41)$$

Matriz de Rigidez – Momento M_m y M_n

Como se puede ver en la Figura 4.7, se analizara el momento que genera un giro y un desplazamiento en dirección r.

Figura 4.7: Momento M_m en dirección r



Fuente: propia

Para el cálculo de M_m en este caso se utiliza el método de pendiente de flexión 4.42.

$$M_i = \frac{2EI}{L}(2\theta_j + \theta_k - 3\psi) + M_m^E \quad (4.42)$$

Donde:

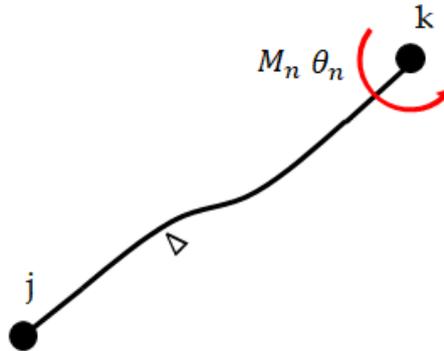
$$\psi = -\frac{\Delta}{l} \quad (4.43)$$

En primer lugar se realiza el remplazo de la Ecuación 4.43 en la Ecuación 4.44, y se tiene en cuenta que al estar presente un giro en esta expresión los valores de $2\theta_j$ y θ_k se cancelan, por lo tanto M_m se presenta en la Ecuación 4.44. Este procedimiento se realizó teniendo en cuenta la metodología de pendiente – deflexión.

$$M_m = \frac{6EI}{L} \frac{\Delta}{L} \quad (4.44)$$

Este mismo procedimiento se realiza para el Momento M_n Figura 4.8.

Figura 4.8: Momento M_m en dirección r



Fuente: propia

De igual manera, para estimar M_n se utilizara el método de pendiente de flexión Ecuación 4.42 y Ecuación 4.44 y tambien se tiene cuenta que como se presenta un giro, los valores de $2\theta_j$ y θ_k se cancelan. Por lo tanto M_n presenta un valor en Ecuación 4.45.

$$M_n = \frac{6EI}{L} \frac{\Delta}{L} \quad (4.45)$$

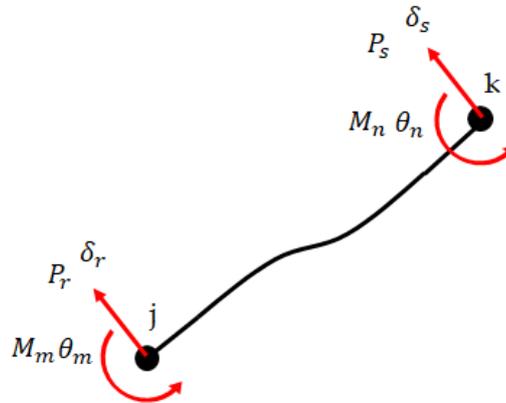
Los datos de M_m y M_n se anexan a la matriz de rigidez en coordenadas locales.

$$\begin{pmatrix} P_t \\ P_r \\ M_m \\ P_h \\ P_s \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_t \\ \delta_r \\ \theta_m \\ \delta_h \\ \delta_s \\ \theta_n \end{pmatrix} \quad (4.46)$$

Matriz de Rigidez - Fuerzas P_s y P_r con respecto al desplazamiento

Como se puede ver en la Figura 4.9, se analizara las fuerzas P_r y P_s con respecto al cortante y desplazamiento en la matriz de rigidez.

Figura 4.9: Fuerzas Pr y Ps



Fuente: propia

En este caso se aplica el teorema de viga conjugada, a partir de la sumatoria de momentos (Ecuación 4.47)

$$\frac{6EI}{L^2} + \frac{6EI}{L^2} + V_n L = 0 \quad (4.47)$$

Donde:
 V_n : Cortante

Como se puede ver en la 4.48 se realiza el despeje del cortante V_n a partir de la Ecuación 4.47.

$$V_n = -\frac{12EI}{L^3} \quad (4.48)$$

Por otro lado, en la Ecuación 4.49 se presenta la sumatoria de fuerzas en términos de cortante a partir del teorema de viga conjugada.

$$V_m + V_n = 0 \quad (4.49)$$

En la Ecuación 4.50 se realiza el correspondiente despeje de la variable de cortante V_m y la sustitución de los valores de la variable V_n .

$$V_m = \frac{12EI}{L^3} \quad (4.50)$$

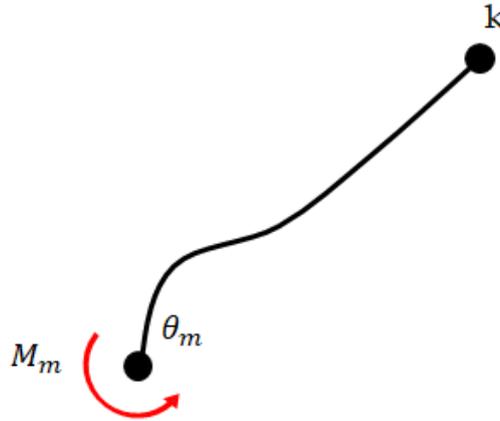
Tomando los valores de V_n y V_m de la Ecuación 4.48 y Ecuación 4.50 respectivamente; se procede a integrarlos en la matriz de rigidez en coordenadas locales, siendo datos correspondientes a las variables de fuerza P_r y P_s .

$$\begin{pmatrix} P_t \\ P_r \\ M_m \\ P_h \\ P_s \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_t \\ \delta_r \\ \theta_m \\ \delta_h \\ \delta_s \\ \theta_n \end{pmatrix} \quad (4.51)$$

Matriz de Rigidez - Relación entre M_i y θ

Se analizará el momento M_m que realizan el giro θ_m , Figura 4.10.

Figura 4.10: Relación entre M_m y θ_m



Fuente: propia

Para calcular esta relación se emplea el método de pendiente – flexión 4.52

$$M_m = \frac{2EI}{L}(2\theta_m + \theta_n - 3\psi) + M_m^E \quad (4.52)$$

En la Ecuación 4.53 opera la ecuación de M_m con el fin de que quede en función de θ_m .

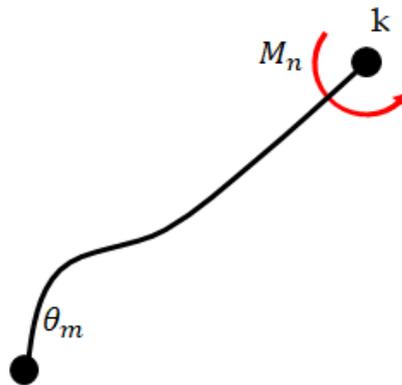
$$M_m = \frac{2EI}{L}(2\theta_m) \quad (4.53)$$

Por medio de la anterior ecuación, se despeja la relación M_m/θ_m Ecuación 4.54

$$\frac{M_m}{\theta_m} = \frac{4EI}{L} \quad (4.54)$$

Por otro lado, se realiza el mismo procedimiento, pero con la relación M_n/θ_m la cual se puede ver en la Figura 4.11

Figura 4.11: Relación entre M_n y θ_m



Fuente: propia

De igual manera, para calcular esta relación se emplea el método de pendiente de flexión Ecuación 4.55

$$M_n = \frac{2EI}{L}(2\theta_n + \theta_m - 3\psi) + M_n^E \quad (4.55)$$

Como se puede ver en Ecuación 4.56 se realiza la operación y el despeje de la relación M_n/θ_m .

$$\frac{M_n}{\theta_m} = \frac{2EI}{L} \quad (4.56)$$

Tomando los valores de M_m/θ_m y M_n/θ_m de la ecuación 4.54; se procede a integrarlos en la matriz de rigidez en coordenadas locales, como se podrá ver en la siguiente matriz.

$$\begin{pmatrix} P_t \\ P_r \\ M_m \\ P_h \\ P_s \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_t \\ \delta_r \\ \theta_m \\ \delta_h \\ \delta_s \\ \theta_n \end{pmatrix} \quad (4.57)$$

Matriz de Rigidez - Fuerzas Ps y Pr con respecto al giro

En esta sección se analizarán las fuerzas Pr y Ps con respecto al giro en la matriz de rigidez. En este caso se aplicará el teorema de viga conjugada por medio de la sumatoria de momentos Ecuación 4.58

$$\frac{4EI}{L} + \frac{2EI}{L} + V_n L = 0 \quad (4.58)$$

A partir de la ecuación 4.58 se realiza el despeje de la variable Vn en la Ecuación 4.65.

$$V_n = -\frac{6EI}{L^2} \quad (4.59)$$

Por otro lado, en la se presenta la sumatoria de fuerzas en términos del giro a partir del teorema de viga conjugada.

$$V_m + V_n = 0 \quad (4.60)$$

En la Ecuación 4.60 se realiza el correspondiente despeje de la variable de constante Vm y la sustitución de los valores de la variable Vn Ecuación 4.65.

$$V_m = \frac{6EI}{L^2} \quad (4.61)$$

Tomando los valores de V_n y V_m de la Ecuación 4.61 y Ecuación 4.65 respectivamente; se procede a integrarlos en la matriz de rigidez en coordenadas locales, siendo datos correspondientes a las variables de fuerza P_r y P_s .

$$\begin{pmatrix} P_t \\ P_r \\ M_m \\ P_h \\ P_s \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_t \\ \delta_r \\ \theta_m \\ \delta_h \\ \delta_s \\ \theta_n \end{pmatrix} \quad (4.62)$$

Matriz de rigidez en coordenadas locales Completa

Los valores correspondientes a los desplazamientos: δ_h , δ_s y al giro: θ_n , se calculan a partir de los mismos métodos anteriormente expuestos; esto dará como resultado la Matriz de rigidez en coordenadas locales completa.

$$\begin{pmatrix} P_t \\ P_r \\ M_m \\ P_h \\ P_s \\ M_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{AE}{L} & 0 & 0 & -\frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & \frac{AE}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_t \\ \delta_r \\ \theta_m \\ \delta_h \\ \delta_s \\ \theta_n \end{pmatrix} \quad (4.63)$$

Matriz de rigidez en coordenadas Globales

Se desea calcular una matriz de rigidez (K) que entienda el idioma de cualquier componente de un pórtico. Esto se realiza por medio de la Ecuación 4.64.

$$[k_i] = [T]^T [k_i] [T] \quad (4.64)$$

Donde:

$[kT]$: Matriz de rigidez en coordenadas globales

$[T]T$: Matriz de transformación transpuesta

$[k_i]$: Matriz de rigidez en coordenadas Locales

[T] : Matriz de transformación

Al realizar estas operaciones, la matriz en coordenadas globales se expresa como:

$$[k_T] = \rho \begin{pmatrix} \beta C_x^2 & \beta C_x C_y - 12 C_y C_x & -6 L C_y & -\beta C_x^2 - 12 C_y^2 & -\beta C_x C_y + 12 C_y C_x & -6 L C_y \\ \beta C_y C_x - 12 C_x C_y & \beta C_y^2 + 12 C_x^2 & 6 L C_x & -\beta C_y C_x + 12 C_x C_y & -\beta C_y^2 - 12 C_x^2 & 6 L C_x \\ -6 L C_y & 6 L C_x & 4 L^2 & 6 L C_y & -6 L C_x & 2 L^2 \\ \beta C_x^2 - 12 C_y^2 & -\beta C_x C_y + 12 C_y C_x & 6 L C_y & \beta C_x^2 + 12 C_y^2 & \beta C_x C_y - 12 C_y C_x & 6 L C_y \\ -\beta C_y C_x + 12 C_x C_y & -\beta C_y^2 - 12 C_x^2 & -6 L C_x & \beta C_y C_x - 12 C_x C_y & \beta C_y^2 + 12 C_x^2 & -6 L C_x \\ -6 L C_y & 6 L C_x & 2 L^2 & 6 L C_y & -6 L C_x & 4 L^2 \end{pmatrix} \quad (4.65)$$

Este proceso fue adaptado de [26].

4.1.4. Prueba de bondad de ajuste Shapiro-Wilk

Cuando la muestra es como máximo de tamaño 50 se puede contrastar la normalidad con la prueba de shapiro Shapiro-Wilk. Para efectuarla se calcula la media y la varianza muestral, S^2 , y se ordenan las observaciones de menor a mayor. A continuación se calculan las diferencias entre: el primero y el último; el segundo y el penúltimo; el tercero y el antepenúltimo, etc. y se corrigen con unos coeficientes tabulados por Shapiro y Wilk [27].

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^n a_i X_{(i)} \right)^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (4.66)$$

Donde:

$X(1) \leq X(2) \leq \dots \leq X(n)$: valores ordenados de una muestra X_1, X_2, \dots, X_n

a_i : Coeficientes obtenidos de [27].

4.1.5. Prueba de bondad de ajuste K-S

La prueba de Kolmogórov-Smirnov es un método de bondad de ajuste que se utiliza ampliamente para calcular el grado de concordancia existente entre la distribución de un grupo de datos y una distribución de probabilidad continua [28]. La teoría está definida por:

$$D_n = \sup_x |(G(X) - \hat{G}_n(x))| \quad (4.67)$$

Donde:

n : Número de observaciones (independientes)

\hat{G}_n : Distribución acumulativa empírica

$G(x)$: Función de distribución de probabilidad

$$\hat{G}_n(x) = \frac{k}{N. \text{ total de la muestra}} \quad (4.68)$$

$$X = \frac{(m - \bar{x})}{\sigma} \quad (4.69)$$

Donde:

m : muestra

\bar{x} : Media

σ : Desviación Estandar

[29] afirma que por medio de la Ecuación 4.70, se establece que F_n denota la función de distribución de la normal de D_n por medio de la hipótesis nula H_0 de que las observaciones son independientes y tener cdf G .

$$F_n(x) = P[D_n \leq x | H_0] \quad (4.70)$$

Donde:

F_n : Distribución KS

4.1.6. Intervalos de confianza

En primer lugar, se supondrá que se presenta una muestra de distribución normal aleatoria donde se conoce la varianza y la distribución de la media muestral X con varianza y media n . A partir de esto, se puede estandarizar X por medio de la resta de la media y su división por la desviación estándar, dando como resultado la variable a continuación.

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \quad (4.71)$$

La variable Z cuenta con una distribución normal estándar. Para estimar un intervalo de confianza μ se necesita un intervalo de forma $l \leq \mu \leq u$, donde l y u son límites de confianza superior e inferior, además de ser variables aleatorias que se calculan a partir de datos de diferentes muestras. A partir de esto, se supone que se puede determinar valores para l y u de manera que la probabilidad Ecuación 4.72 sea verdad.

$$P(L \leq \mu \leq u) = 1 - \alpha \quad (4.72)$$

Donde $0 \leq \alpha \leq 1$ Existe una probabilidad de $1 - \alpha$ de seleccionar una muestra donde el CI contenga el verdadero valor de μ .

Una vez que se ha calculado l y u , y se ha seleccionado la muestra, se obtiene un intervalo de confianza resultante para μ Ecuación 4.73.

$$l \leq \mu \leq u \quad (4.73)$$

Al presentarse el problema de que Z tiene una distribución normal estándar, su ecuación se presenta de la siguiente Ecuación.

$$P \left[-Z_{\alpha/2} \leq \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma/\sqrt{n}} \leq Z_{\alpha/2} \right] \quad (4.74)$$

Se procede a manipular las cantidades multiplicando por σ/\sqrt{n} restando \bar{X} de cada término, y multiplicando por 1. Esto da como resultado la siguiente Ecuación.

$$P \left[\bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] = 1 - \alpha \quad (4.75)$$

A partir de esto se puede afirmar que, \bar{X} se calcula a partir de la media muestral de una muestra aleatoria de tamaño n de una población normal con varianza conocida σ^2 , el $100(1 - \alpha)\%$ IC en μ está dado por Ecuación 4.76.

$$\left[\bar{X} - Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (4.76)$$

Donde:

n : Numero de datos de la muestra

$Z_{\alpha/2}$: es el $100_{\alpha/2}$ correspondiente al punto porcentual superior de la distribución normal estándar. Proceso adaptado de [30].

Por otro lado [31] afirma que: $\sigma = \sigma^m$.

$$\sigma_m^e = m^* CV_m \quad (4.77)$$

Donde:

$m^* = \mu_m$ = Media estandar

CV_m : Coeficiente de Variación

De igual manera, Según [31] La variable \bar{X} se representara como μ_m^e y esta será igual a:

$$\mu_m^e = m^*(1 - \ln(m^*) + \ln(\mu_m)) \quad (4.78)$$

Para finalizar se aplican las formulas 4.78 y 4.77 en la fórmula 4.76 para obtener el limite superior y el límite inferior.

$$Lim.inferior = \mu_m^e - \frac{Z_{\alpha/2} * \sigma_m^e}{\sqrt{n-1}} \quad (4.79)$$

$$Lim.superior = \mu_m^e + \frac{Z_{\alpha/2} * \sigma_m^e}{\sqrt{n-1}} \quad (4.80)$$

4.2. MARCO CONCEPTUAL

GWP: (Global warming potential), el potencial de calentamiento global es una medida de la cantidad de energía que absorberán las emisiones de una tonelada de gas durante un periodo de tiempo determinado en relación con una tonelada de dióxido de carbono CO₂. [32]

Optimización: Busca encontrar valores variables que realicen la optimización de una función objetivo bajo un conjunto de restricciones con variables. Estas restricciones definen un espacio de búsqueda conocido como región factible donde se incluye las soluciones [33]. Los métodos de optimización se utilizan en muchos campos de estudio con el fin de encontrar soluciones que minimicen o maximicen algunos parámetros de estudio.

Cenizas Volantes: son residuos de color bituminoso finamente dividido, que resulta de la combustión del carbón ya sea en trozos o en polvo, el cual es transportado desde el almacenamiento por los gases de combustión, usualmente utilizado en la fabricación de concretos modificados [34].

Agregados reciclados (RCA): Se derivan principalmente de la trituración y el procesamiento de elementos de concreto estructural que fueron empleados anteriormente. Los RCA contienen metales, tejas, ladrillos y otros materiales mixtos como plástico, papel, vidrio, madera y escombros con concreto triturado [35].

Superplastificantes: Son aditivos que permiten obtener un mejor grado de trabajabilidad en la aplicación del concreto mediante una relación agua / cemento reducida [36], esto genera como resultado que el concreto sea fácil de colocar, esta trabajabilidad del concreto se puede mantener en un período de 1 a 2 horas o más, beneficiando muchos procesos y permitiendo la producción de estructuras duraderas con una reducción en el impacto medioambiental [37].

Función Objetivo: Esta especifica la medida cuantitativa en el desempeño del sistema que se desea (optimizar o maximizar), se puede utilizar para la determinación de costos, de ventas y fabricación de algún producto [38].

Variables: Se clasifican en dos categorías desde un punto de vista funcional; variable independiente o principal y variables dependientes o auxiliares, estas son la representación de las decisiones que se toman y pueden llegar a afectar la función objetivo [38].

Restricciones: son básicamente un conjunto de reglas que se representan a través de ecuaciones o inecuaciones donde se obliga a las variables a obedecer para logra satisfacer las necesidades del problema que se plantea [38].

Algoritmo de evolución diferencial: se basa es un método de búsqueda paralelo directo que utiliza vectores de parámetros no lineales dimensionales como población para cada generación y se basa en la teoría de selección natural de Darwin [23].

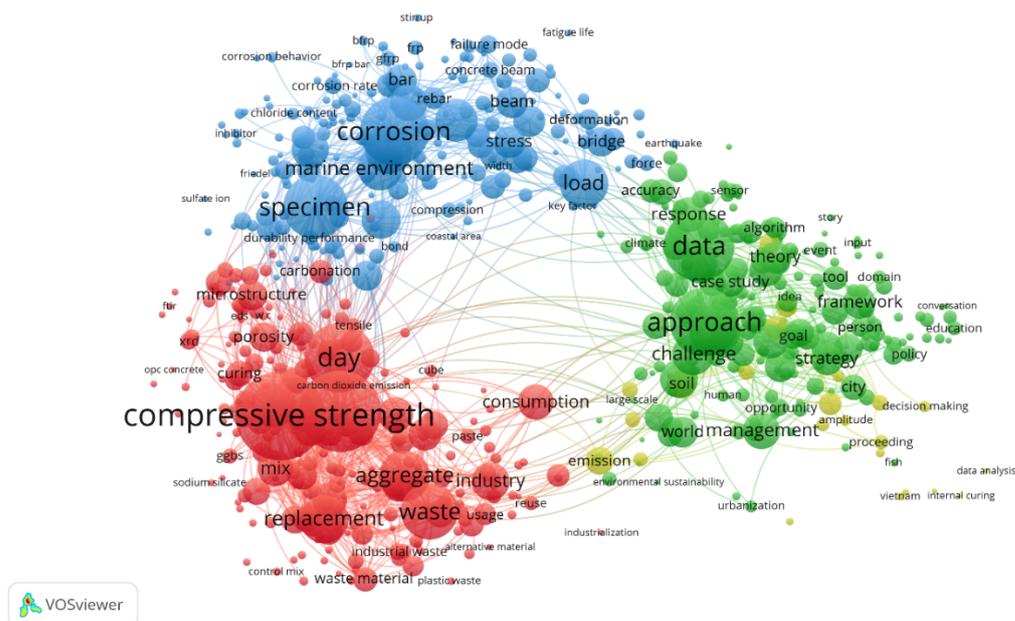
Optimización por enjambre de partículas: es una técnica de optimización basada en poblaciones inspirada en el movimiento de cardúmenes y bandadas de aves, que tiene similitud con las técnicas de computación evolutiva. El sistema de esta optimización inicia con una población de aleatoria de soluciones x y la búsqueda de soluciones óptimas por medio de la actualización de generaciones [39].

Capítulo 5

ESTADO DEL ARTE

Se utiliza la ecuación de búsqueda (Concrete AND Environmental) en la plataforma VOSviewer con el fin de analizar los 2000 primeros resultados de la base de datos Scopus organizado por importancia (del más citado al menos citado). El mapa de clusters o temas principales se evidencia en la Figura 5.1. A partir de esto, se encontraron las siguientes palabras claves que están relacionadas con este trabajo: Datos, es importante mencionar que esta investigación se basara en los datos ya existentes el GWP generado en la fabricación de concreto modificado. Por otro lado, se encuentra resistencia a la compresión, que en relación con esta investigación se presenta como una restricción a los algoritmos de optimización se usados, así como los esfuerzos máximos a los que estan sometidos los elementos y los desplazamientos máximos de las estructuras.

Figura 5.1: Clusters encontrados en Scopus



Fuente: Adaptado de VOSviewer

A continuación se presenta la recopilación de estudios realizados en los últimos años en el campo de la optimización aplicada a la ingeniería civil, específicamente en el área de estructuras involucrando temas medio ambientales. Los modelos de optimización presentados, en su mayoría tenían como finalidad la disminución en costos, materiales e impactos ambientales. Cada uno contaba con un modelo y metodología que dependían de las variables escogidas y de los objetivos plateados (multi-objetivos o mono-objetivos).

En primer lugar se presentan modelos de optimización que fueron aplicados a agregados no convencionales para concreto reforzado con el fin de remplazar y mejorar las mezclas de concreto, sus propiedades mecánicas o disminuir las emisiones de CO_2 producidas por la elaboración del concreto convencional.

[40] presentan una investigación que tiene como objetivo analizar cuatro alternativas de concreto con agregados de río, piedra triturada y concreto reciclado, esto con el fin de presentar el agregado óptimo y el escenario de transporte para la producción del concreto, esto se realiza por medio del método de optimización multicriterio que tuvo en cuenta límites ambientales, económicos y técnicos; los criterios de evaluación del límite económico se determinaron por medio del estado del mercado de concreto en Serbia para el año 2015 y los ambientales se determinaron por medio de la metodología de la evaluación del ciclo de vida. Esta investigación se centró en justificar y comparar la validez de uso del concreto reciclado como árido frente a áridos naturales que se usan para la producción del concreto.

Del mismo modo [41] Realiza un proceso de optimización del método de tratamiento y la calidad de los escombros de construcción como árido reciclado a partir de la máquina de prueba de Los Ángeles mediante el método de molienda de bolas, este proceso se realizó por medio de siete muestras de concreto a una edad de 28 días e incluyen 0 %, 20 %, 40 % y 60 % de agregado reciclado. Como resultado se obtuvo que la máquina de los ángeles y la optimización mejoraran las características físicas y mecánicas del agregado reciclado.

Algo semejante es planteado por [42] que en su artículo de investigación también hace uso y aplica la metodología de optimización de molino de bolas con fibra de basalto y humo de sílice para la durabilidad del concreto con agregados reciclado tratado y sin tratar a la edad de 28 días. Se determinó a partir de 84 series concretas, la mejor serie objetivo de acuerdo a los resultados experimentales en los cuales se evidenció que al tener una combinación de 10 % de humo de sílice más 20 % de cenizas volantes más 20 % de escoria se obtuvo una resistencia satisfactoria en comparación con el concreto de control.

Hay que mencionar además, que así como los materiales residuos de la construcción son utilizados para implementar nuevas alternativas de solución a los altos índices de contaminantes, existen otros tipos de materiales o residuos que al ser agregados al concreto convencional ofrecen una buena alternativa de solución como lo plantea [4], quien busca la forma de solucionar los daños estructurales producidos

por la retracción y secado del concreto como las grietas, la idea se basa en la aplicación de fibras poliméricas utilizando botellas PET en el proceso de elaboración de concreto ecológico con el fin de optimizar las propiedades mecánicas de compresión y tracción siguiendo las pautas establecidas en las normas técnicas brasileñas ABTN para concreto convencional, el resultado de este estudio demostró que el uso de agregados ecológicos puede mejorar y superar las propiedades mecánicas de compresión y tracción del concreto convencional entre un 14.3 % y un 16.6 %, respectivamente.

A partir de lo dicho anteriormente se encuentra que [43], también realiza una optimización que se centra en el uso de un compuesto conformado de caucho reciclado que contiene zeolita y humo de sílice para mezclas de concreto, se tuvieron en cuenta parámetros de resistencia a la compresión y el contenido de caucho como objetivos principales para esta optimización. Por otro lado, se llevaron a cabo pruebas ultrasónicas para evaluar los efectos del caucho, pruebas de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión y no sólo los autores mencionados anteriormente han incursionado en la implementación de polímeros sino también otros como [44] presentan la unión de los modelos de predicción y de los parámetros para cuatro índices de concreto con agregado reciclado grueso reforzado con fibra de macropileno y para aceros de punta de gancho. Como resultado se indicó que los agregados reciclados son un factor de influencia crucial para las propiedades mecánicas del material.

A su vez [45] plantea y realiza una propuesta basada en las mezclas de concreto que contienen diferentes cantidades de cenizas volantes y agregados reciclados llamado CONCREtop. Esto se realizó a partir de una metodología multicriterio y teniendo en cuenta características como el rendimiento de la estructura, el ciclo económico de vida y aspectos ambientales. Como resultado se obtuvo que CONCREtop presente una sencilla aplicación (no requiere tiempo y recursos excesivos) y adicionalmente se demostró que la incorporación tanto de cenizas volantes como de agregado reciclado grueso generan resultados de mezclas óptimas de concreto en términos de características del mismo y a partir de lo descrito en el estudio mencionado anteriormente, los mismos autores [1] plantean en otra de sus investigaciones una metodología que a partir del ciclo de vida desean entender el comportamiento en 27 diferentes mezclas de concreto modificado entre el uso de mezclas de concreto con altas cantidad de agregados reciclados y/o cenizas volantes y el impacto ambiental que genera en el GWP, de igual manera consideraron comportamientos mecánicos como el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión y tracción.

De igual manera [46] expone en su investigación estrategias sostenibles para la planificación de los suministros de agregados de diferentes fuentes basándose en la integración de la metodología de evaluación del ciclo de vida y la optimización multiobjetivo; esto se realiza con el fin de disminuir los impactos ambientales y el costo de los materiales cumpliendo los objetivos de demanda y emisiones, como también lo expone [47] que en su documento describe un enfoque de optimización para equilibrar el costo del ciclo de vida y los impactos ambientales en casas típicas de Australia por medio de programación lineal el cual permite identificar los diseños alternativos más adecuados enfocándose en uno o varios objetivos.

Además del uso de diferentes materiales alternativos que puedan llegar a disminuir los impactos ambientales generados por el uso de concreto convencional, cabe mencionar que Todas estas observaciones relacionan la importancia del uso de software computacionales que ayudan a obtener de forma más rápida una solución óptima como lo menciona [48] quienes realizan una optimización por medio de un algoritmo de simulación de empaquetamiento de las mezclas de concreto compuestas por áridos reciclados y empaque de agregados en busca de un concreto con una mejor resistencia a la compresión. Como resultado se obtuvo que las mezclas de agregados optimizadas se pueden utilizar para el diseño de concreto con un contenido menor de material cementoso, además de proporcionar un mejor rendimiento.

La misma técnica es usada por [49] que plantea el desarrollo sostenible del concreto utilizando fibra de ultra alto rendimiento tomando como base puntos de vista teóricos y prácticos. Para la ejecución de este estudio se emplean dos tipos de estrategias que consisten en un modelo de empaquetamiento de partículas y la aplicación adecuada de materiales sustitutivos, los resultados muestran que al usar el modelo de empaque mejorado y los materiales adecuados se puede lograr obtener un diseño de esqueleto de concreto de ultra rendimiento más denso con una cantidad baja de aglutinante y emisiones de CO_2 .

Efectivamente las técnicas utilizadas y las investigaciones que se realizan son abundantes, los estudios encontrados y mencionados en los párrafos anteriores son solo una muestra; para continuar se mencionan los siguientes estudios que están centrados en el análisis estructural con el fin de optimizar los elementos que componen la estructura empleando métodos computacionales como lo demuestran [50] quienes implementan una técnica de optimización computacional que combina la programación de un software para el análisis estructural y el método de optimización de recocido simulado donde su objetivo principal es agrupar automáticamente las dimensiones de la sección transversal de vigas estructurales de concreto para disminuir el costo de la estructura, además [51] ofrece un método de optimización a través de la programación basada en la metodología de evolución computacional para el cronograma de detalle de los refuerzos de las losas de concreto armado por medio de un equilibrio entre el costo total de instalación, la reducción de las pérdidas por corte y la construcción sostenible.

Así por ejemplo [52] buscan innovar presentando una metodología nueva que permite el mejoramiento del comportamiento sísmico del concreto reforzado y para estructuras de acero incorporando un algoritmo BP (Back Propagation), esta optimización permite hacer la corrección automática del coeficiente de daño asumidos que tienen en cuenta los índices de daños locales y globales, este proceso se aplica en un pórtico en concreto reforzado de seis pisos para el cual es necesario determinar las dimensiones de la sección y la relación de esfuerzos correspondientes. Sin embargo, [53] abordan en un nuevo tema y usan una metodología que implica el uso de meta-modelos con el método de Deep Learning para la toma de decisiones multicriterios para el diseño optimizado de losas unidireccionales que permita calcular miles de

soluciones en tiempo real con base a lo estipulado por el diseñador, las combinaciones son calculadas por un algoritmo heurístico que proporciona resultados como rigidez, costo por metro cuadrado, emisiones de CO_2 y energía incorporada. Los resultados obtenidos indican que las soluciones multicriterios suponen una reducción significativa de emisiones de CO_2 y de energía incorporada en comparación con las soluciones monocriterios

De la misma forma, en el estudio presentado por [22] se realiza la optimización de la emisión de CO_2 y de la energía incorporada que produce una columna de concreto armado. Esto se realizó por medio de diversos análisis de condiciones de carga en la columna. Por otro lado, el análisis de los resultados de la optimización presenta que cuando se aumenta el costo un 10 % la energía incorporada desciende un 22 % y el gasto CO_2 un 63 % dando una forma eficaz en el proceso de diseño convencional de columnas.

Finalmente [54] realizan una investigación donde plantean como objetivos buscar múltiples soluciones que puedan ser aplicadas en el ámbito de la optimización para el diseño de la estructura de un puente viga - cajón que a través de un método multiobjetivo genere automáticamente un grupo de soluciones estructurales óptimas teniendo en cuenta la geometría, resistencia del concreto, armadura y acero postensado donde se implican términos de reducciones de CO_2 factores de seguridad y costo. El Estudio arroja como resultado que se logran reducir las emisiones de CO_2 entre un 6 % y un 16 %, los costos entre un 3 % y un 14 %, lo cual indica que una reducción de un euro implica reducir 2.34 kg de emisiones de CO_2 .

Además de plantear un modelo de optimización multiobjetivo para generar automáticamente un grupo de soluciones, también [55], pretenden buscar una solución óptima para el diseño de puentes no solo en términos de costos sino también minimizar los impactos ambientales y sociales. Como resultado este estudio propone un método para el diseño y selección de puentes óptimamente sostenibles. Este método ha sido ilustrado en un estudio donde se usa como base un puente de vigas de cajón de concreto postensado de tres tramos diseñado mediante la energía incorporada. En conclusión se propone una optimización multiobjetivo asistida por matemático para el diseño de soluciones óptimas y una técnica de toma de decisiones cuando se cuenta con condiciones de incertidumbre.

Como aportes a esta investigación, se encontraron relaciones positivas entre los modelos de optimización y componentes estructurales con presencia de algún agregado reciclado; se resaltó la mejora de propiedades mecánicas del concreto debido a la mezcla simultánea de agregados reciclados y otros materiales cementosos como la ceniza volante. Por otro lado, se tuvo en cuenta la variabilidad de factores como el módulo de elasticidad de los concretos y el GWP.

Así mismo se encontraron brechas relacionadas a la aplicación de estas técnicas de optimización de agentes ambientales en la construcción de pórticos en concreto reforzado con materiales reciclados o alternativos. De igual manera varios de los

documentos tenían enfoques multi-objetivos lo que presentaba una diferencia entre los algoritmos y metodologías a usar en esta investigación, así como un mayor gasto computacional. Por último, lo encontrado en la literatura enfocaba exclusivamente a las emisiones producidas por CO_2 .

Capítulo 6

OBJETIVOS

6.1. OBJETIVO GENERAL

Identificar los tipos de concreto modificado del estudio “A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete” que aplicado a pórticos de tres, seis y nueve pisos de concreto resistentes a momento minimice el gasto de Potencial de Calentamiento global (GWP) generado por el concreto convencional.

6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer restricciones de desplazamiento generados a partir de las fuerzas horizontales sísmicas para cada pórtico en concreto convencional.
- Acoplar los algoritmos DEA y PSO con el análisis matricial de pórticos 2D para la optimización del GWP en cada elemento del portico.
- Analizar de manera probalística los mejores módulos de elasticidad obtenido de los algoritmos de todos los pórticos seleccionados por medio de pruebas de bondad de ajuste e intervalos de confianza.

Capítulo 7

ALCANCES Y LIMITACIONES

7.1. ALCANCES

Se pretende alcanzar la identificación de los tipos de concreto modificado que permitan minimizar el valor del potencial de calentamiento global (GWP por su significado en inglés) en pórticos de tres, seis y nueve pisos, tomando como base los valores de módulo de elasticidad y gasto de GWP de 27 concretos modificados propuestos por [1].

7.2. LIMITACIONES

Teniendo en cuenta que la base para este proyecto son 27 datos de concreto modificado con cenizas volantes, agregados reciclados finos, agregados reciclados gruesos Y superplastificante hallados en la literatura de investigaciones previas, es posible que se pueda llegar a requerir un número mayor de muestras o alternativas de concreto modificado para continuar o mejorar el desarrollo de la investigación. Por otro lado, solo se estudiará la disminución de gasto de GWP en pórticos de concreto resistente a momento con tres, seis y nueve pisos obtenidos de [56] donde especifica la sección transversal de cada elemento de los tres pórticos.

De igual manera, para el proceso de optimización se tendrá en cuenta solo restricciones de desplazamiento obtenidas a partir de las fuerzas horizontales sísmicas, además de que se van a emplear algoritmos estándar (DEA y PSO) y no meta-heurísticas para hacer una mejora de los procesos de búsqueda de los algoritmos.

Capítulo 8

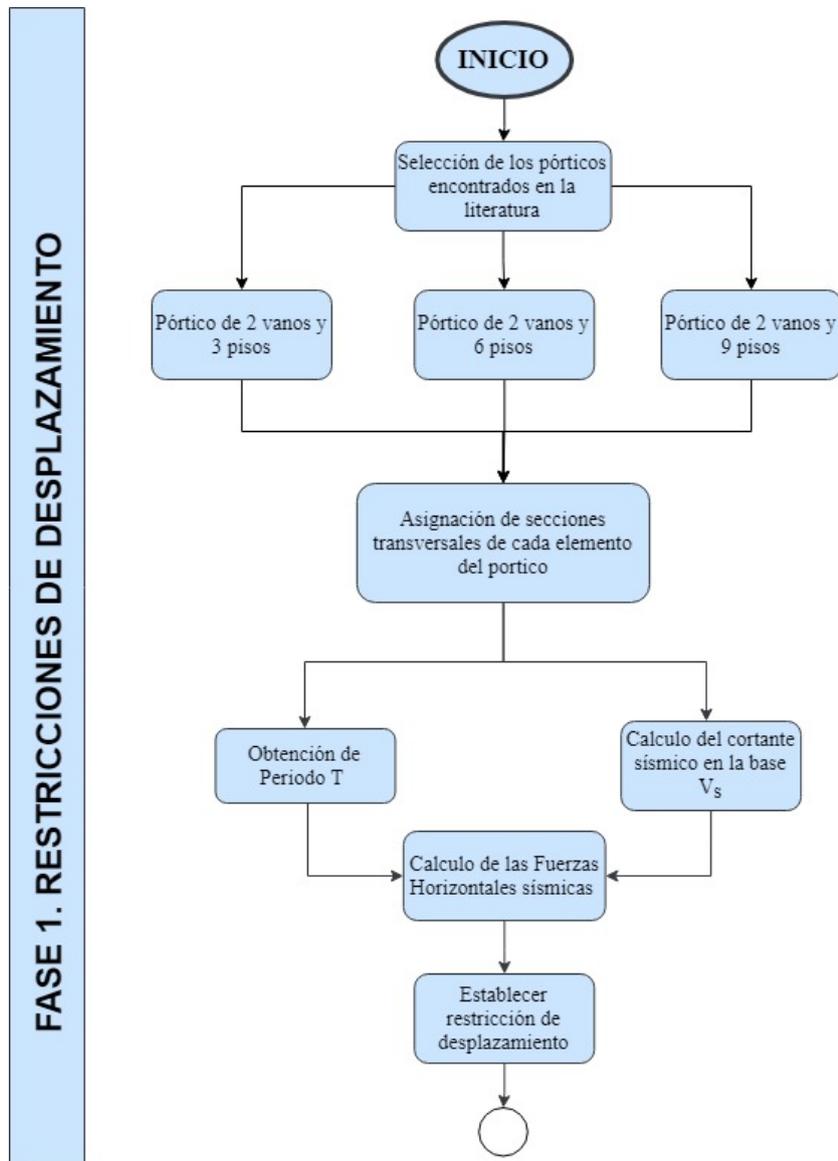
METODOLOGÍA

La metodología que se propone pretende definir el procedimiento a seguir para cumplir con los objetivos establecidos. Este procedimiento se realiza por medio de tres fases las cuales tienen un enfoque relacionado a cada uno de los objetivos específicos propuestos anteriormente.

8.1. FASE 1. RESTRICCIONES DE DESPLAZAMIENTOS

Para iniciar se seleccionan los pórticos a estudiar a partir de [56] los cuales presentan tres pórticos de tres, seis y nueve pisos cada uno con dos vanos y una sección transversal asignada para cada elemento. Por medio del software Sap2000 se ingresa la información de estos tres pórticos con concreto convencional con el fin de obtener en primer lugar el periodo fundamental de la estructura mediante análisis modal para un movimiento horizontal, y el peso de cada piso de las estructuras así como el peso total; esto se realiza con el objetivo de calcular el cortante sísmico en la base V_s y las fuerzas horizontales sísmicas F_x que generaran los desplazamientos que se utilizaron como restricciones a los algoritmos de la fase 2. Este proceso se evidenciará en la figura 8.1.

Figura 8.1: Metodología Fase 1. Restricciones de Desplazamiento

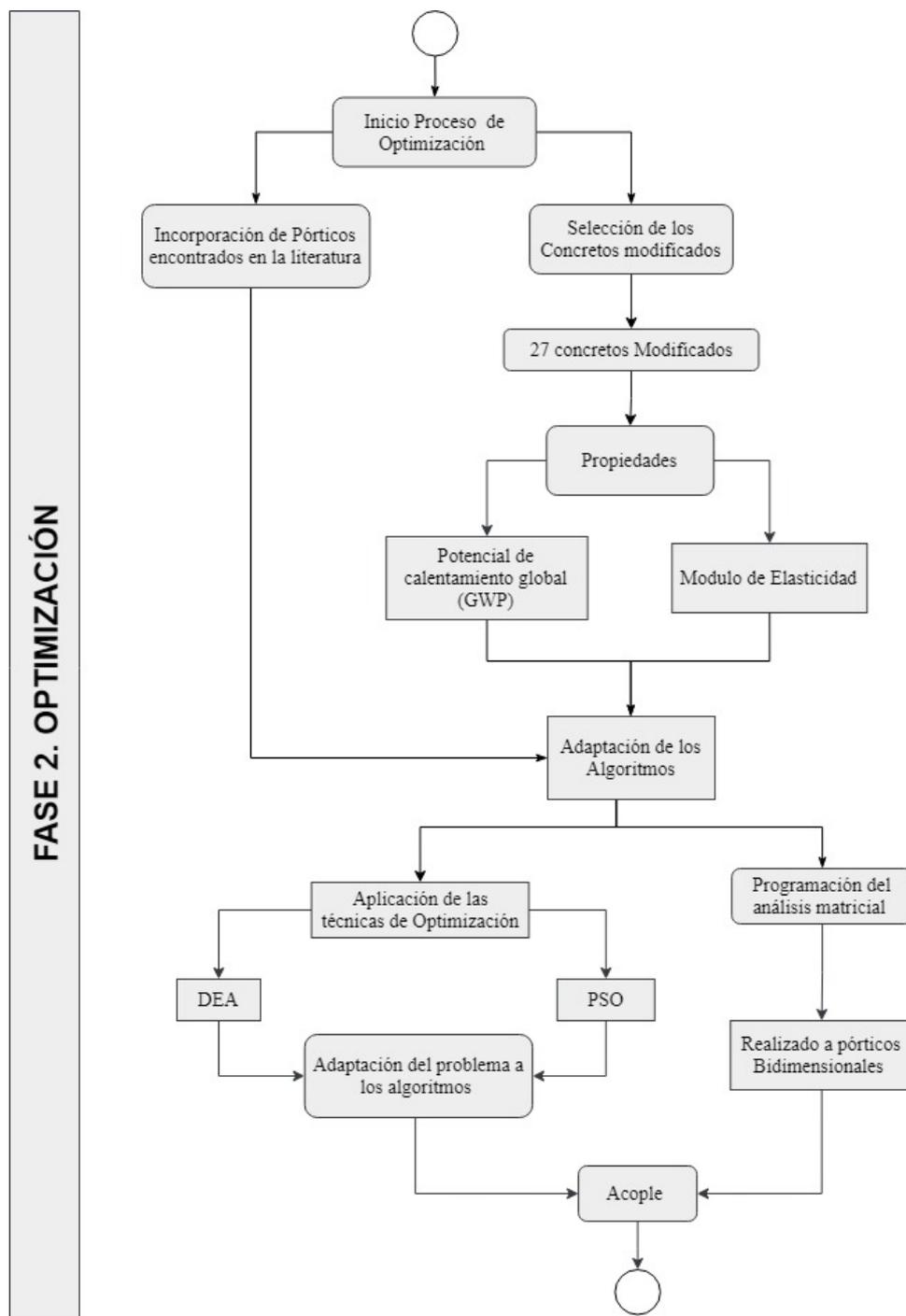


Fuente: propia

8.2. FASE 2. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Como se puede ver en la figura 8.2 se inicia el proceso de optimización a partir de la información de los pórticos nombrados en el fase 1 y de la selección de los concretos modificados a trabajar, para este caso se seleccionaron 27 concretos modificados de [1] cada uno con su respectivo módulo de elasticidad y gasto de GWP. Esta información se ingresa al algoritmo donde se acopla el código de las técnicas de optimización DEA Y PSO junto con el código del análisis matricial para pórticos bidimensionales con el fin de optimizar el GWP cumpliendo las restricciones de desplazamiento.

Figura 8.2: Metodología Fase 2. Optimización



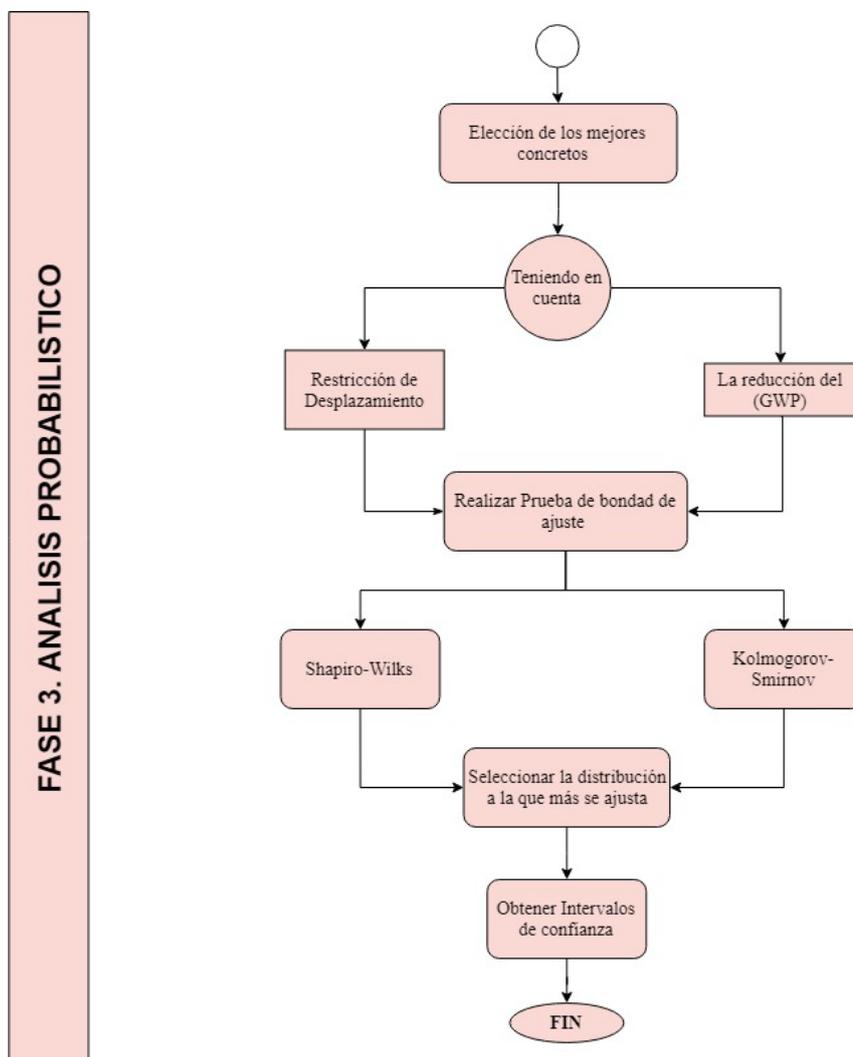
Fuente: propia

Se usó el software MatLab para el desarrollo de los códigos. Cabe aclarar que el tutor de esta investigación cuenta con los códigos en versión estándar, por lo cual el procedimiento constará en adaptar estos códigos al problema específico de esta investigación.

8.3. FASE 3. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO

Como se puede ver en la figura 8.3, para cada técnica de optimización se obtienen los concretos que aplicados a los tres diferentes pórticos obtienen la menor cantidad de GWP teniendo en cuenta las restricciones de desplazamiento. Continuando, se realiza la prueba de bondad de ajuste al conjunto de los módulos de elasticidad de cada técnica a partir de los métodos de Shapiro-Wilks y Kolmogórov-Smirnov. Para finalizar se obtienen los intervalos de confianza.

Figura 8.3: Metodología Fase 3. Análsis probabilistico



Fuente: propia

Este procedimiento se realizará para las dos técnicas de optimización con el fin de comparar resultados y presentar conclusiones entorno a esto, dado que se parte del teorema “No Free Lunch” el cual especifica que no existe un algoritmo mejor para un problema en particular.

Capítulo 9

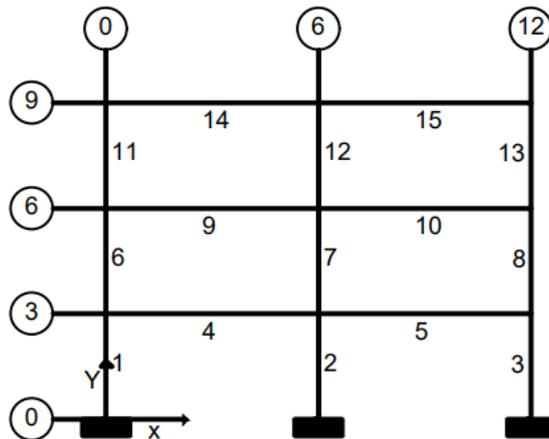
MODELOS A OPTIMIZAR

A continuación se encontrará la descripción de los tres pórticos a optimizar tomados de [56] y las fuerzas calculadas por medio del método de Fuerza Horizontal Equivalente que se tuvieron en cuenta en cada uno de estos pórticos.

9.1. PÓRTICO DE 3 PISOS

Como se puede ver en la figura 9.1, el primer pórtico de estudio cuenta con tres pisos cada uno de 3 metros para una altura total de la estructura aporricada de 9 metros y una base total de 12 metros correspondiente a vanos de 6 metros. Sus 15 elementos fueron enumerados de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. Por otro lado, se trabajó con un sistema de coordenadas cartesianas con su origen en el apoyo del elemento número 1.

Figura 9.1: Elementos Portico de 3 Pisos



Fuente: propia

Según [56], presenta 4 diferentes tipos de columnas (C) y 2 tipos de vigas (B) clasificados por medio de un ID o identificación cada uno con sus respectivos datos de sección transversal, por otro lado se evidencia cual es el ID que corresponde a cada uno de los elementos del pórtico con su debida agrupación como se puede ver

en el en el Cuadro 9.1.

Cuadro 9.1: Sección transversal Portico de 3 Pisos

ID	Grupo	Elementos	Base (m)	Altura (m)
C1	1	1-3-6-8	0.3	0.45
C2	2	2-7	0.4	0.55
C3	3	11-13	0.3	0.45
C4	4	12	0.35	0.5
B1	5	4-5-9-10	0.3	0.4
B2	6	14-15	0.25	0.4

Fuente: Adaptado de [56]

Para el cálculo de las Fuerzas Horizontales Equivalentes se utilizó el software Sap2000 donde se modeló el sistema aporticado con los datos de la sección transversal del Cuadro 9.1 y las coordenadas y elementos de la figura 9.1. Por otro lado se trabajó con datos de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión los cuales corresponden a un concreto normal sin modificar, estos datos se pueden ver en la cuadro 9.2.

Cuadro 9.2: Modulo de Elasticidad y Resistencia a la Compresión

Modulo de Elasticidad (E)	43.8 GPa
Resistencia a la Compresión (f'c)	55.8 MPa

Fuente: Adaptado de [1]

Por otro lado, [56] afirma que cada uno de los elementos presenta las siguientes cargas que se tuvieron en cuenta para la estructura porticada.

Cuadro 9.3: Cargas de la estructura

Carga Muerta (CM)	25 kN/m
Carga viva (CV)	10 kN/m

Fuente: Adaptado de [1]

A partir de estos datos se obtiene la masa total de la estructura por medio del principio de superposición de las reacciones producto de la carga muerta y la carga viva.

$$Peso\ total\ 3\ pisos = 1460,508kN = 1460518N \quad (9.1)$$

Se realiza el cálculo de la masa por medio de la división del peso sobre la gravedad, como se puede ver a continuación.

$$Masa\ total\ 3\ pisos = \frac{1460518N}{9,81\frac{m}{s^2}} = 148880,5301kg \quad (9.2)$$

Ya teniendo esta información, en el software Sap2000 se presenta la forma modal de desplazamiento horizontal y del cual se obtiene el tiempo que tarda la estructura en completar un ciclo de vibración.

$$T = 0,42301s \quad (9.3)$$

Las fuerzas provenientes de un sismo que atacan horizontalmente a cada uno de los pisos de la estructura, parten de un cortante sísmico en la base V_s que se presenta al nivel de los apoyos de la estructura, este cortante es calculado por medio de la siguiente ecuación:

$$V_s = S_a g M \quad (9.4)$$

Donde:

S_a : aceleración espectral

g : gravedad

M : masa de la estructura

De igual manera, la estructura necesita una fuerza para desplazarse, es por esto que [56] presenta un conjunto de expresiones para la aceleración espectral que dependen del periodo calculado, en el caso del pórtico de tres pisos la expresión que satisface el valor del periodo es:

$$S_a = \frac{S_{XS}}{B_1}, \text{ para } T_0 < T < T_S \quad (9.5)$$

Donde:

T_0 : 0.12

T_S : 0.62

S_{XS} : 0.546

β : Amortiguamiento para una estructura en concreto: 0.05

$$B_1 = \frac{4}{5,6 - \ln(100\beta)} \quad (9.6)$$

Se realiza el cálculo de B_1 teniendo en cuenta el valor de amortiguamiento para una estructura en concreto.

$$B_1 = \frac{4}{5,6 - \ln(100 * 0,05)} = 1 \quad (9.7)$$

A partir de esto la aceleración espectral presenta un valor de:

$$S_a = 0,546 \quad (9.8)$$

Ya con los datos de aceleración espectral y masa se procede a realizar el cálculo del cortante sísmico en la base V_s .

$$V_s = 0,546 * 9,81 \frac{m}{seg^2} * 148880,5301Kg = 797442,8282N = 797,44kN \quad (9.9)$$

Para obtener la fuerza horizontal en cada nivel de la estructura aporticada a partir del cortante sísmico V_s , dado por el Título A de la NSR-10 [57]. La fuerza Horizontal Equivalente F_x en cualquier nivel x se determina usando la siguiente expresión:

$$F_x = C_{vx} * V_s \quad (9.10)$$

Donde:

$$C_{VX} = \frac{m_x * h_x^k}{\sum_{i=1}^n (m_i * h_i^k)} \quad (9.11)$$

Donde:

K : Exponente en función del periodo

$$\text{Si } T \leq 0,5s, k = 1 \quad (9.12)$$

$$\text{Si } 0,5 \leq T \leq 2,5s, k = 0,75 + 0,5T \quad (9.13)$$

$$\text{Si } T \geq 2,5s, k = 2,0 \quad (9.14)$$

Donde:

m :Peso

h :Altura

A partir del periodo obtenido en la ecuación 9.3 se obtiene para el portico de tres pisos un $k=1$.

Para finalizar, se aplican las fórmulas 9.11 y 9.10 de C_{vx} y de la fuerza sísmica horizontal F_x para cada piso del pórtico; esto se podrá ver evidenciado en la Cuadro 9.4.

Cuadro 9.4: Fuerzas Horizontales Portico de 3 Pisos

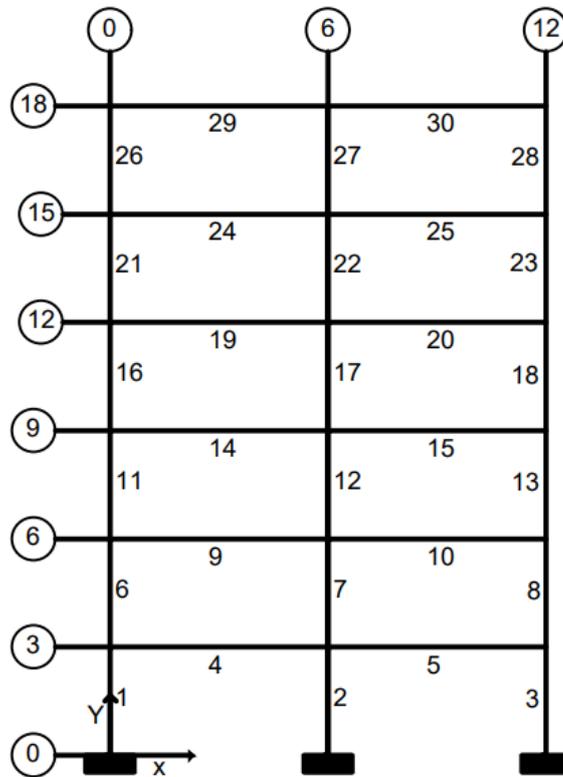
Piso	Peso (kN)	Altura (m)	C_{vx} (m)	Fuerzas (kN)
3	472,199	9	0,491	391,409
2	489,838	6	0,339	270,687
1	489,838	3	0,170	135,344

Fuente: Propia

9.2. PÓRTICO DE 6 PISOS

Como se puede ver en la figura 9.2, el segundo pórtico a trabajar cuenta con seis pisos cada uno de 3 metros para una altura total de la estructura aporricada de 18 metros y una base total de 12 metros distribuidos en dos vanos de 6 metros cada uno. Sus 30 elementos fueron enumerados de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. De igual manera, se trabajó con un sistema de coordenadas cartesianas con su origen en el apoyo del elemento número 1.

Figura 9.2: Elementos Portico de 6 Pisos



Fuente: propia

Según [56], presenta 8 diferentes tipos de columnas (C) y 2 tipos de vigas (B) con su respectivo ID y sección transversal, por otro en el Cuadro 9.5 se presentan los elementos del pórtico con su grupo asignado.

Cuadro 9.5: Sección transversal Portico de 6 Pisos

ID	Grupo	Elementos	Base (m)	Altura (m)
C1	1	1-3	0,3	0,4
C2	2	2	0,35	0,55
C3	3	6-8-11-13-16-18	0,3	0,4
C4	4	7-12-17	0,35	0,55
C5	5	21-23	0,3	0,4
C6	6	22	0,35	0,5
C7	7	26-28	0,3	0,4
C8	8	27	0,35	0,5
B1	9	4-5-9-10-14-15-19-20	0,3	0,45
B2	10	24-25-29-30	0,3	0,45

Fuente: Adaptado de [56]

De igual manera, Para el cálculo de las fuerzas horizontales equivalentes se utilizó el software Sap2000 donde se modeló el sistema aporticado con los datos de la sección transversal del Cuadro 9.5 y las coordenadas y elementos de la figura 9.2. Por otro lado se trabajó con datos de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión dados en el Cuadro 9.2 y los valores de la carga muerta y carga viva del Cuadro 9.3. Por medio del principio de superposición de las reacciones de la carga muerta y carga viva se obtiene la masa total de la estructura.

$$\text{Peso total 6 pisos} = 2937,601kN = 2937601N \quad (9.15)$$

A continuación se realiza el cálculo de la masa por medio de la división del peso sobre la gravedad.

$$\text{Masa total 6 pisos} = \frac{2937601N}{9,81\frac{m}{s^2}} = 299449,643kg \quad (9.16)$$

Ya teniendo esta información, en el software Sap2000 se presenta el desplazamiento horizontal de forma modal y del cual se obtiene el periodo de la estructura.

$$T = 0,89s \quad (9.17)$$

Para el cálculo del cortante sísmico en la base V_s del pórtico de seis pisos se presenta en primer lugar el valor de la aceleración espectral S_a , el cual está en función del periodo T obtenido anteriormente, según [56] la expresión que cumple con este periodo es:

$$S_a = \frac{S_{x1}}{B_1 T^2}, \text{ Para } T_S < T < T_L \quad (9.18)$$

Donde:

T_L : 8s

T_S : 0.62

S_{x1} : 0.337

B_1 : 1 Según ecuación 9.7

A partir de esto la aceleración espectral presenta un valor de:

$$S_a = 0,423 \quad (9.19)$$

Ya con los datos de aceleración espectral y masa se procese a realizar el cálculo del cortante sísmico en la base V_s .

$$V_s = 0,423 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 299449,643kg = 1241423,009N = 1241,423kN \quad (9.20)$$

A partir de la información dada en la [57] y evidenciada en las formulas 9.11 y 9.10, la Fuerza Horizontal Equivalente F_x en los seis niveles del pórtico a trabajar se identifican en el siguiente cuadro.

Cuadro 9.6: Fuerzas Horizontales Portico de 6 Pisos

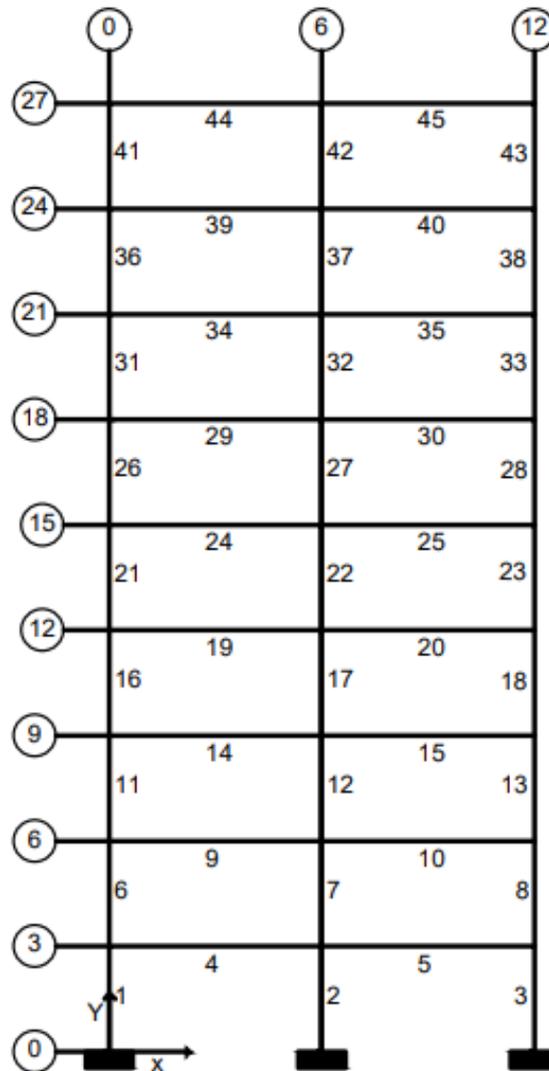
Piso	Peso (kN)	Altura (m)	C_{vx} (m)	Fuerzas (kN)
6	474,45	18	0,302	374,448
5	490,022	15	0,250	310,940
4	490,022	12	0,192	238,080
3	490,022	9	0,136	168,746
2	490,022	6	0,084	103,882
1	490,022	3	0,037	45,327

Fuente: Propia

9.3. PÓRTICO DE 9 PISOS

Como se puede ver en la figura 9.3, el último pórtico a trabajar cuenta con nueve pisos cada uno de 3 metros para una altura total de la estructura apoticada de 27 metros y una base total de 12 metros distribuidos de manera equidistante en dos vanos. Sus 45 elementos fueron enumerados de izquierda a derecha y de abajo hacia arriba. De igual manera, se trabajó con un sistema de coordenadas cartesianas con su origen en el apoyo del elemento número 1.

Figura 9.3: Elementos Portico de 9 Pisos



Fuente: Propia

Según [56], presenta 8 diferentes tipos de columnas (C) y 3 tipos de vigas (B) con su respectivo ID y sección transversal; por otro en el Cuadro 9.7 se evidencia cual es el ID que corresponde a cada uno de los elementos del pórtico con su grupo asignado.

Cuadro 9.7: Sección transversal Portico de 9 Pisos

ID	Grupo	Elementos	Base (m)	Altura (m)
C1	1	1-3-6-8-11-13	0,4	0,6
C2	2	2-7-12	0,45	0,6
C3	3	16-17-18-21-23-26-28	0,35	0,55
C4	4	22-27-32	0,4	0,6
C5	5	31-33-36-38	0,35	0,4
C6	6	37	0,35	0,5
C7	7	41-43	0,35	0,4
C8	8	42	0,35	0,5
B1	9	4-5-9-10-14-15	0,4	0,45
B2	10	19-20-24-25-29-30	0,3	0,45
B3	11	34-35-39-40-44-45	0,25	0,45

Fuente: Adaptado de [56]

De igual manera, se modelo el sistema aporricado con los datos de la sección trasversal del Cudro 9.7 y las coordenadas y elementos de la figura 9.3. Por otro lado se trabajó con datos de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión dados en el Cuadro 9.2 y los valores de la carga muerta y carga viva del Cuadro 9.3. Por medio del principio de superposición de las reacciones de la carga muerta y carga viva se obtiene el peso total de la estructura.

$$Peso\ total\ 9\ pisos = 4545,898kN = 4545898N \quad (9.21)$$

A continuación se realiza el cálculo de la masa por medio de la división del peso sobre la gravedad.

$$Masa\ total\ 9\ pisos = \frac{4545898N}{9,81\frac{m}{s^2}} = 463394,292kg \quad (9.22)$$

Ya teniendo esta información, en el software Sap2000 se presenta la deformación horizontal de manera modal y del cual se obtiene el periodo de la estructura.

$$T = 1,082s \quad (9.23)$$

A partir del periodo obtenido anteriormente se realiza el cálculo de la aceleración espectral por medio de la ecuación 9.18 teniendo en cuenta que el periodo se

encuentra dentro de los parámetros establecidos por esta ecuación.

$$S_a = 0,288 \quad (9.24)$$

Ya con los datos de aceleración espectral y masa se procese a realizar el cálculo del cortante sísmico en la base V_s a partir de la ecuación 9.4.

$$V_s = 0,288 * 9,81 \frac{m}{s^2} * 463394,292kg = 1308564,295N = 1308,564kN \quad (9.25)$$

Para el cálculo de la fuerza horizontal sísmica F_x en los nueve pisos, se tuvieron en cuenta las fórmulas 9.10 y 9.11 dadas por [57]. Estos valores calculados se evidenciarán en la siguiente tabla.

Cuadro 9.8: Fuerzas Horizontales Pórtico de 9 Pisos

Piso	Peso (kN)	Altura (m)	C_{vx} (m)	Fuerzas (kN)
9	498,842	27	0,216	283,005
8	525,840	24	0,196	256,240
7	525,840	21	0,165	215,665
6	525,840	18	0,135	176,746
5	525,840	15	0,107	139,678
4	525,840	12	0,080	104,717
3	525,840	9	0,055	72,231
2	525,840	6	0,033	42,794
1	525,840	3	0,013	17,489

Fuente: Propia

Capítulo 10

ALGORITMOS ACOPLADOS

10.1. ALGORITMO DE EVOLUCIÓN DIFERENCIAL

Como se puede ver en la figura 10.1 para acoplar el Algoritmo de Evolución Diferencial al problema presentado en primer lugar se debe incorporar la teoría del análisis matricial para pórticos bidimensionales en el algoritmo, esto con el fin de obtener las restricciones de desplazamiento que presentan el pórtico si estuviera en concreto convencional. Para esto se requiere datos de entrada como: las fuerzas horizontales sísmicas halladas en el capítulo anterior, el módulo de elasticidad del concreto convencional igual a 43,8 Gpa obtenido de [1] e información de los pórticos, como la inercia, coordenadas, sección transversal y los grados de libertad.

Teniendo esta información, como se puede ver en la figura 10.2 el algoritmo da apertura al procedimiento de optimización del DEA donde presenta como primer paso la creación de una población inicial (x) totalmente aleatoria que es representada de forma matricial a partir de la información del pórtico y de los datos de módulo de elasticidad de cuadro 10.1 que presenta 27 diferentes concretos modificados con: cenizas volantes (FA), ágregados reciclados finos (F), ágregado reciclados grueso (C) y superplastificante (SP) (los valores que se encuentran en el subíndice representan el porcentaje de cada uno de estos en las diferentes mezclas de concreto). En ese mismo contexto, el algoritmo somete a esta población al mismo análisis matricial realizado al pórtico en concreto convencional con el fin de conocer las restricciones de desplazamiento (Dx) que presenta esta población inicial y la comparación de estas restricciones con las anteriormente calculadas para los pórticos en concreto convencional, en dado caso que alguna de las restricciones de la población inicial sobrepase a las restricciones del concreto convencional el algoritmo procede a aplicarle la ecuación 4.4 de penalización.

Cuadro 10.1: Gasto de GWP de cada concreto modificado fuente

No.	Detalles	E (GPa)	GWP (kgCO ₂ eq)
1	$FA_0 F_0 C_0$	43,8	362
2	$FA_0 F_{50} C_0$	39	361
3	$FA_0 F_{100} C_0$	34,7	360
4	$FA_{30} F_0 C_0$	41,4	269
5	$FA_{30} F_{50} C_0$	38,3	268
6	$FA_{30} F_{100} C_0$	32,4	267
7	$FA_{60} F_0 C_0$	38	176
8	$FA_{60} F_{50} C_0$	34,1	174
9	$FA_{60} F_{100} C_0$	32,3	174
10	$FA_0 F_0 C_{100}$	37,1	331
11	$FA_0 F_{50} C_{100}$	32,5	331
12	$FA_0 F_{100} C_{100}$	28	330
13	$FA_{30} F_0 C_{100}$	34,8	238
14	$FA_{30} F_{50} C_{100}$	32,5	238
15	$FA_{30} F_{100} C_{100}$	29,7	237
16	$FA_{60} F_0 C_{100}$	33	145
17	$FA_{60} F_{50}$	29,4	145
18	$FA_{60} F_{100}$	26,9	144
19	$FA_0 F_0 C_{0SP}$	51,4	364
20	$FA_0 F_{100} C_{0SP}$	39,9	363
21	$FA_{30} F_{50} C_{0SP}$	43,9	270
22	$FA_{60} F_0 C_{0SP}$	40,7	179
23	$FA_{60} F_{100} C_{0SP}$	34,4	177
24	$FA_0 F_0 C_{100SP}$	43,5	332
25	$FA_0 F_{100} C_{100SP}$	33,9	331
26	$FA_{30} F_{50}$	38,3	238
27	$FA_{60} F_0 C_{100SP}$	38,3	146
28	$FA_{60} F_{100} C_{100SP}$	30,1	145

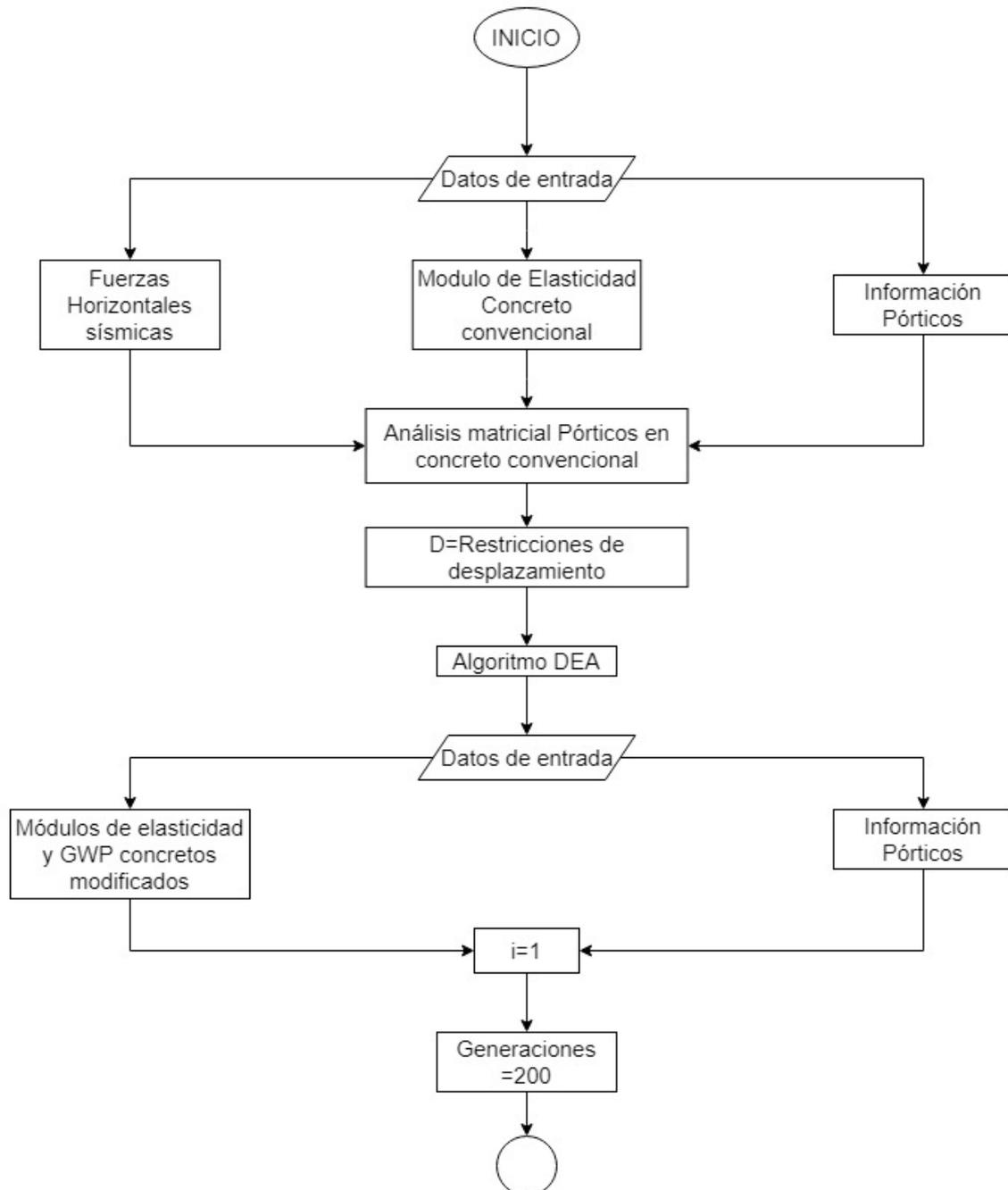
Fuente: Adaptado de [1]

A estos resultados de la población inicial se les aplica el operador de mutación de la ecuación 4.5 para obtener una nueva población llamada población mutada (v), a la cual de igual manera se le calcula restricciones de desplazamiento (Dv) por medio del análisis matricial y se realiza el procedimiento de aplicar el operador de mutación a las que no cumplan con las restricciones máximas de desplazamiento. Esta población, se compara y combina con la población inicial teniendo en cuenta los parámetros de la ecuación 4.7 con el fin de generar una nueva población combinada (u) a la cual se le aplica el mismo paso a seguir para las restricciones de desplazamiento (Du).

Para finalizar, el algoritmo compara los valores de la población inicial y la población combinada con el fin de seleccionar para cada elemento del pórtico el concreto que cumpla con las restricciones y presente en menor gasto de GWP. Esto dará como

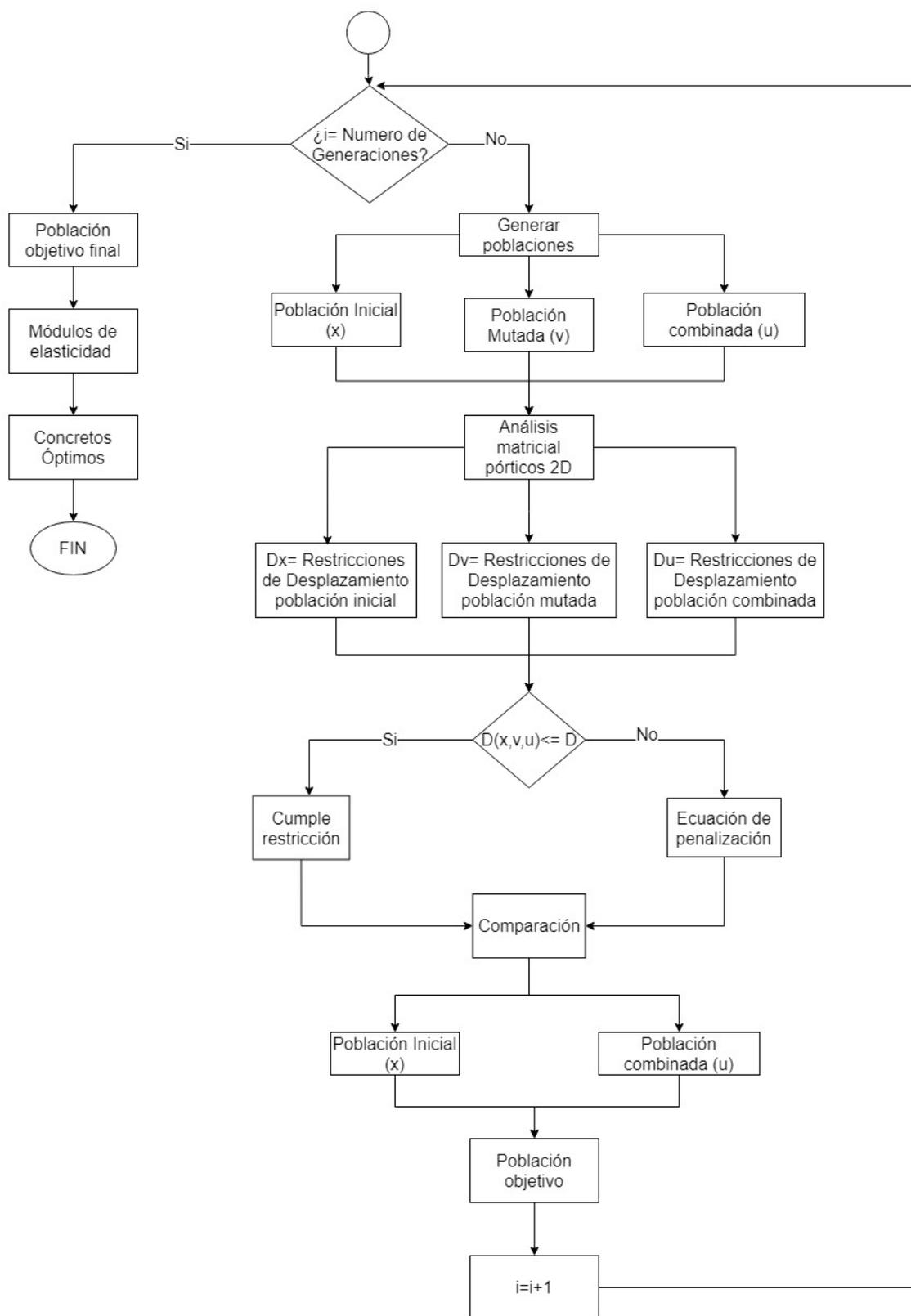
resultado una nueva población objetivo la cual en la siguiente generación sustituirá a la población inicial y continuará con el procedimiento anteriormente explicado. Este algoritmo correrá el número de generaciones establecidas en este caso 200 y en la última generación seleccionara la población objetivo que será el conjunto de concretos óptimos seleccionados por el algoritmo como los que reducen el mayor gasto de GWP y cumplen con las restricciones de desplazamiento.

Figura 10.1: Acople del algoritmo DEA al problema



Fuente: Propia

Figura 10.2: Acople del algoritmo DEA al problema



Fuente: Propia

10.2. OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

A diferencia del Algoritmo de Evolución Diferencial, la Optimización por enjambre de partículas presenta una convergencia en su algoritmo en donde después de varias iteraciones encuentra un mejor resultado. Este comportamiento en la convergencia del algoritmo hace que en algunos casos no se cumplan las restricciones de desplazamiento propuestas o el resultado fuera peor que el obtenido con el DEA. El comportamiento de PSO se puede deber a la selección discreta de las poblaciones. En este algoritmo solo se realiza una variación a la población inicial, el cual corresponde a la velocidad que se le da a cada una de las partículas para posteriormente comparar la partícula modificada con la original y elegir la mejor, por el contrario en DEA la población sufría un proceso de mutación y recombinación, incrementando la variación en la descendencia de las poblaciones iniciales. De modo tal que, debido a las razones anteriormente presentadas se elige el algoritmo de evolución diferencial como la técnica de optimización elegida para analizar los resultados de esta investigación.

Capítulo 11

PÓRTICOS OPTIMIZADOS

A partir del procedimiento del Algoritmo de evolución diferencial explicado en el capítulo anterior; se puede evidenciar en los cuadros 11.1, 11.2 y 11.3 el conjunto de concretos óptimos para cada pórtico con su respectivo módulo de elasticidad y gasto de GWP, que fueron seleccionados después de 200 generaciones y cumplieron con las restricciones de desplazamiento. De igual manera se evidencia el gasto de GWP que presenta cada uno de los elementos del pórtico de acuerdo a su sección transversal (volumen del elemento "GWP_V(kgCO₂eq)") y el gasto total de todo el pórtico.

Cuadro 11.1: Módulos de elasticidad óptimos y gasto de GWP del pórtico de 3 pisos

Elem.	ID	E.Opt(KPa)	Detalle	GWP(kgCO ₂ eq)	GWP _V (kgCO ₂ eq)
1	C1	33000000	$FA_{60} F_0 C_{100}$	145	58.725
2	C2	40700000	$FA_{60} F_0 C_{0SP}$	179	118.140
3	C1	33000000	$FA_{60} F_0 C_{100}$	145	58,725
4	B1	51400000	$FA_0 F_0 C_{0SP}$	364	262.080
5	B1	51400000	$FA_0 F_0 C_{0SP}$	364	262.080
6	C1	33000000	$FA_{60} F_0 C_{100}$	145	58.72
7	C2	40700000	$FA_{60} F_0 C_{0SP}$	179	118.140
8	C1	33000000	$FA_{60} F_0 C_{100}$	145	58.725
9	B1	51400000	$FA_0 F_0 C_{0SP}$	364	262.080
10	B1	51400000	$FA_0 F_0 C_{0SP}$	364	262.080
11	C3	33000000	$FA_{60} F_0 C_{100}$	145	58.725
12	C4	33000000	$FA_{60} F_0 C_{100}$	145	76.125
13	C3	33000000	$FA_{60} F_0 C_{100}$	145	58.725
14	B2	40700000	$FA_{60} F_0 C_{0SP}$	179	107.400
15	B2	40700000	$FA_{60} F_0 C_{0SP}$	179	107.400
					1096,635

Fuente: Adaptado de [1]

Cuadro 11.2: Modulos de elasticidad optimos y gasto de GWP del portido de 6 Pisos

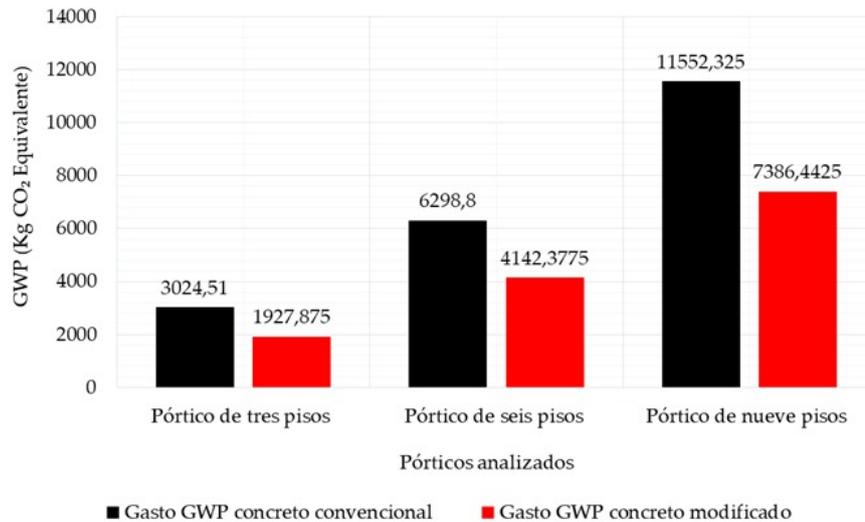
Elem.	ID	E.Opt(KPa)	Detalle	GWP(kgCO ₂ eq)	GWP _V (kgCO ₂)
1	C1	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	52,200
2	C2	38000000	$FA_{60}F_0C_0$	176	101,640
3	C1	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	52,200
4	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,840
5	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,840
6	C3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	64,440
7	C4	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,738
8	C3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	64,440
9	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,840
10	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,840
11	C3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	64,440
12	C4	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,738
13	C3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	64,440
14	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,840
15	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,840
16	C3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	64,440
17	C4	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,738
18	C3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	64,440
19	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,840
20	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,840
21	C5	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	52,200
22	C6	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	76,125
23	C5	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	52,200
24	B2	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	144,990
25	B2	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	144,990
26	C7	26900000	$FA_{60}F_{100}$	144	51,840
27	C8	26900000	$FA_{60}F_{100}$	144	75,600
28	C7	26900000	$FA_{60}F_{100}$	144	51,840
29	B2	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	144,990
30	B2	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	144,990
					4142,3775

Cuadro 11.3: Modulos de elasticidad optimos y gasto de GWP del portido de 9 Pisos

Elem	ID	E Opt (KPa)	Detalle	GWP(kgCO ₂ eq)	GWPv (kgCO ₂ eq)
1	C1	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	104,4
2	C2	38000000	$FA_{60}F_0C_0$	176	142,56
3	C1	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	104,4
4	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	393,12
5	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	393,12
6	C1	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	104,4
7	C2	38000000	$FA_{60}F_0C_0$	176	142,56
8	C1	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	104,4
9	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	393,12
10	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	393,12
11	C1	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	104,4
12	C2	38000000	$FA_{60}F_0C_0$	176	142,56
13	C1	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	104,4
14	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	393,12
15	B1	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	393,12
16	C3	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,7375
17	C3	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,7375
18	C3	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,7375
19	B2	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,84
20	B2	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,84
21	C3	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,7375
22	C4	34100000	$FA_{60}F_{50}C_0$	174	125,28
23	C3	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,7375
24	B2	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,84
25	B2	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,84
26	C3	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,7375
27	C4	34100000	$FA_{60}F_{50}C_0$	174	125,28
28	C3	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	83,7375
29	B2	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,84
30	B2	51400000	$FA_0F_0C_{0SP}$	364	294,84
31	C5	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	60,9
32	C4	34100000	$FA_{60}F_{50}C_0$	174	125,28
33	C5	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	60,9
34	B3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	120,825
35	B3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	120,825
36	C5	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	60,9
37	C6	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	76,125
38	C5	33000000	$FA_{60}F_0C_{100}$	145	60,9
39	B3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	120,825
40	B3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	120,825
41	C7	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	60,9
42	C8	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	76,125
43	C7	30100000	$FA_{60}F_{100}C_{100SP}$	145	60,9
44	B3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	120,825
45	B3	40700000	$FA_{60}F_0C_{0SP}$	179	120,825
				7386,4425	

En la figura 11.1 se puede evidenciar la disminución del gasto de GWP que se obtuvo en los tres pórticos con concreto modificado a través del proceso de optimización. Esta comparación se realiza a partir de gasto de GWP del concreto convencional el cual genera 362 kg CO₂ por m³ según los datos publicados por [1].

Figura 11.1: Comparación gasto de GWP de concreto Modificado optimo con Concreto convencional



Fuente: Propia

Por otro lado, en el Cuadro 11.4 se realiza el consolidado de los módulos de elasticidad óptimos que corresponden a cada uno de los diferentes ID de los tres pórticos trabajados.

Cuadro 11.4: Consolidado Modulos de Elasticidad Optimos

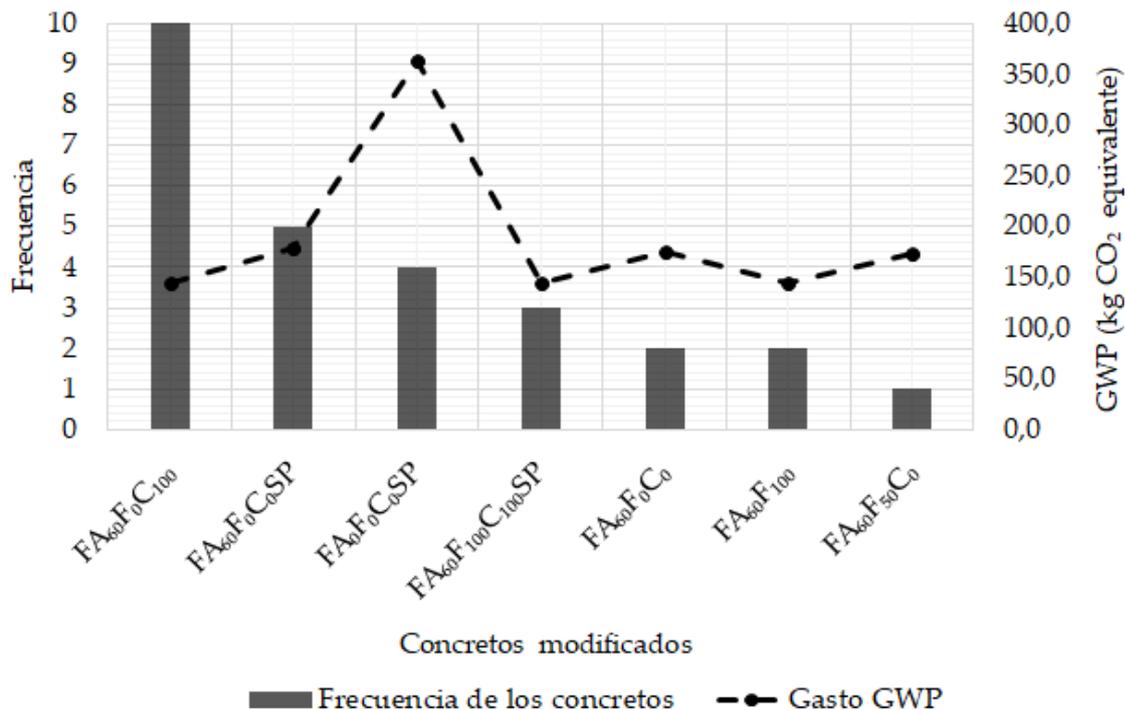
Nivel	ID	Modulo de Elasticidad	Gasto de GWP
3 Niveles	C1	33000000	58,725
	C2	40700000	118,14
	C3	33000000	58,725
	C4	33000000	76,125
	B1	51400000	262,08
	B2	40700000	107,4
6 Niveles	C1	33000000	52,2
	C2	38000000	101,64
	C3	40700000	64,44
	C4	33000000	83,7375
	C5	33000000	52,2
	C6	33000000	76,125
	C7	26900000	51,84
	C8	26900000	75,6
	B1	51400000	294,84
	B2	40700000	144,99
9 Niveles	C1	30100000	104,4
	C2	38000000	142,56
	C3	33000000	83,7375
	C4	34100000	125,28
	C5	33000000	60,9
	C6	33000000	76,125
	C7	30100000	60,9
	C8	30100000	76,125
	B1	51400000	393,12
	B2	51400000	294,84
	B3	40700000	120,825

De los 27 concretos modificados presentados al inicio se evidencio que 7 de los módulos de elasticidad correspondientes a siete concretos modificados (ver figura 11.2 fueron los seleccionados en el proceso de optimización como los más aptos para disminuir el gasto del GWP en el concreto.

Por otro lado, se evidencia que el concreto $FA_{60}F_0C_{100}$ posee la mayor frecuencia y el menor gasto de GWP dado en $kgCO_2$ equivalente, solo presenta resultados positivos en ID correspondientes a secciones transversales de columnas. En ese mismo orden de ideas los concretos $FA_{60}F_0C_0$, $FA_{60}F_{100}$ y $FA_{60}F_{50}C_0$ de menor frecuencia se aplican solo para secciones transversales de columnas de los pórticos de 6 y 9 pisos. Así mismo, estos cuatro concretos modificados presentan una similitud en el porcentaje cenizas volantes (60%), esto se debe a sus características puzolanas que actuarían de forma positiva en la resistencia del concreto de columnas proporcionando rigidez al desplazamiento y ayudando a cumplir las restricciones establecidas.

Igualmente, el concreto $FA_{60}F_0C_{0SP}$ que fue el segundo concreto que presentó mayor frecuencia es aplicado tanto en vigas de los pisos superiores de los tres pórticos como en columnas de los pórticos de 3 y 6 niveles. De igual los concretos modificados $FA_0 F_0 C_{0SP}$ y $FA_{60} F_{100} C_0$ con una frecuencia de 4 y 3 correspondientemente, fueron seleccionados como aptos en la optimización del gasto de GWP solo en las secciones transversales de las vigas; pero como se puede ver en la gráfica de líneas discontinuas se evidencia que el concreto $FA_0 F_0 C_{0SP}$ a pesar de ser el tercer concreto con mayor frecuencia revela que de los siete concretos óptimos es el que presenta más impacto en el gasto GWP; esto se debe a que este concreto se diseñó solo con superplastificante, es decir carece de agregados reciclados lo que genera que este concreto presente un mayor gasto de GWP.

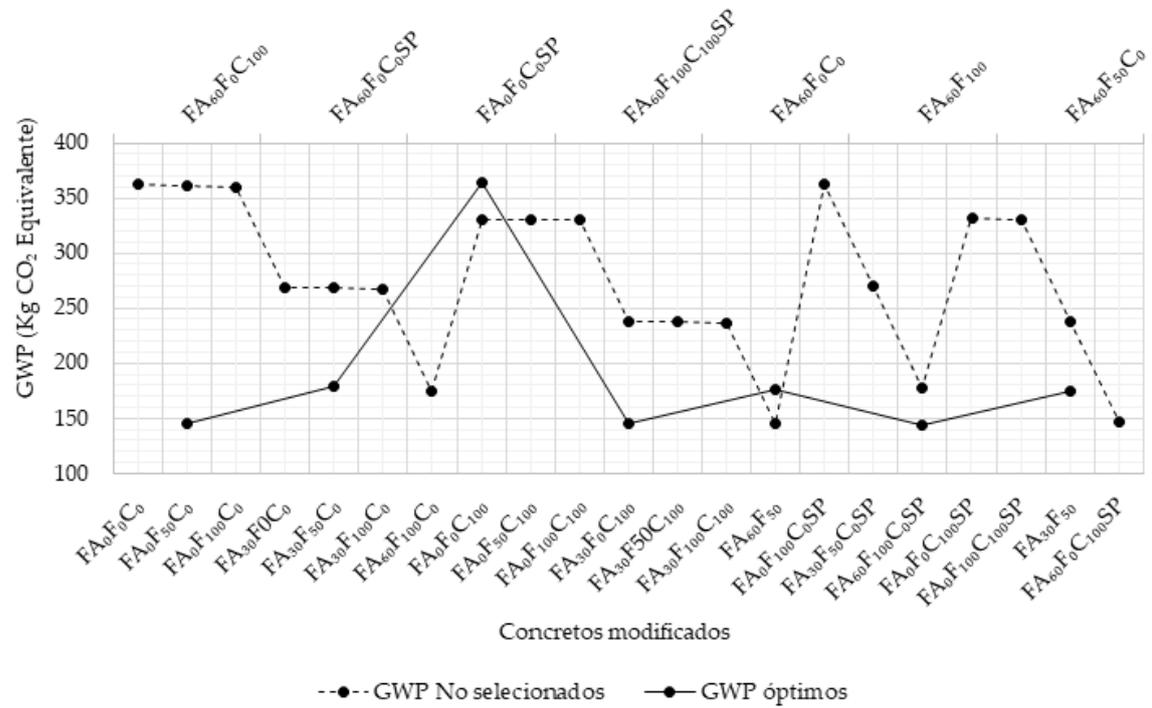
Figura 11.2: Frecuencia Modulos de elasticidad y gasto de GWP Concretos Optimos



Fuente: Propia

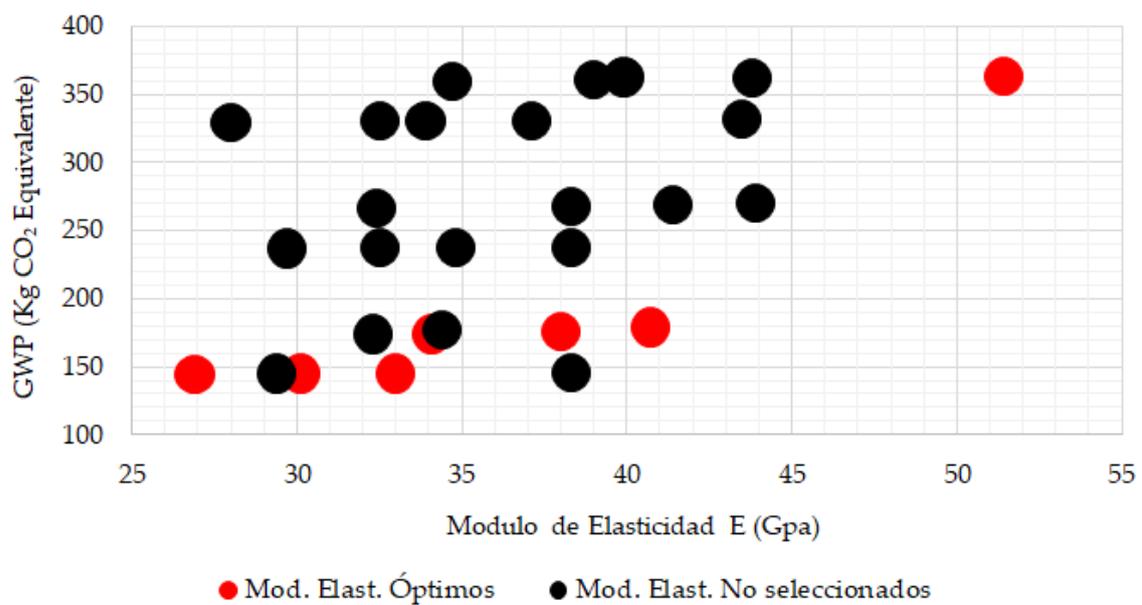
A demás se realizó la comparación entre estos siete concretos óptimos y los 20 concretos modificados que no fueron seleccionados por el algoritmo, se evidencia en la figura 11.3 que el gasto de GWP de los concretos óptimos $FA_{60} F_0 C_{100}$, $FA_{60} F_{100} C_{SP}$ y $FA_{60} F_{100}$ indican que cumpliendo las restricciones de desplazamiento, son los concretos que presentan menores gastos de GWP de todos los concretos modificados, por el contrario el concreto $FA_0 F_0 C_{SP}$ presenta el mayor gasto de GWP de todos los concretos modificados trabajados además de superar el gasto de GWP del concreto convencional.

Figura 11.3: Comparación gasto de GWP concreto optimo con concreto modificados



Fuente: Propia

Figura 11.4: Comparación Modulo de elasticidad y GWP



Fuente: Propia

En ese mismo contexto en la figura 11.4 se visualiza que los concretos $FA_{60} F_0$, C_{100} , $FA_{60} F_{100} C_0$ y $FA_{60} F_{100}$ a pesar de presentar menor gasto de GWP también son los que presentan menor módulo de elasticidad, deduciendo que el gasto de GWP es proporcional a el Modulo de Elasticidad. Esto puede generar afectaciones tanto en el área estructural como en el área ambiental, pues para que una estructura no presente grandes deformaciones necesita un módulo de elasticidad elevado pero esto implicaría de igual manera un gasto elevado de GWP.

Capítulo 12

ANÁLISIS PROBABILISTA

12.1. PRUEBA DE BONDAD DE AJUSTE

Se desea determinar si el conjunto de datos de módulos de elasticidad obtenidos en la optimización DEA se ajustan a una determinada distribución de probabilidad, en este caso se realizará por medio de Shapiro-Wilks dado que se cuentan con menos de 50 datos y por Kolmogorov-Smirnov con el fin de comparar el ajuste para cuatro funciones de probabilidad (Normal, Lognormal, Gamma y Beta).

12.1.1. Prueba de Shapiro-Wilks

Se realiza la prueba de bondad de Shapiro-Wilks para conocer si la muestra del Cuadro 11.4 presenta una distribución normal realizada para un nivel de significancia de 0.05 por medio del siguiente procedimiento:

Como se puede ver en el Cuadro 12.1 en la primera columna se enumera de forma consecutiva del 1 hasta el número de la muestra en este caso 27. son asignados los módulos de elasticidad óptimos a cada uno de los datos dados en el Cuadro 11.4, se procede a ordenar estos valores de menor a mayor para X_i y de mayor a menor para los valores de $X_{(n-i+1)}$ y se calcula la diferencia de estos dos datos para $X(i)$.

Por otro lado, los coeficientes a_i se obtienen por medio de la tabla de coeficientes a_i para el contraste de Shapiro-Wilks presente en [27] para 27 datos de la muestra, esto se realiza con el fin de multiplicar el valor de a_i con los valores de $X(i)$. De igual manera, se realiza el cálculo de $(x_i - \bar{X})^2$ teniendo en cuenta que 3678888,9 se trabaja como valor de la media.

Cuadro 12.1: Distribución normal Prueba Shapiro-Wilks

X	Módulo	Xi	X(n-i+1)	X(i)	ai	ai*X(i)	$(Xi - \bar{X})^2$
1	3300000	2690000	5140000	2450000	0,4366	10696700	9,779E+13
2	4070000	2690000	5140000	2450000	0,3018	7394100	9,779E+13
3	3300000	3010000	5140000	2130000	0,2522	5371860	4,474E+13
4	3300000	3010000	5140000	2130000	0,2152	4583760	4,474E+13
5	5140000	3010000	4070000	1060000	0,1848	1958880	4,474E+13
6	4070000	3300000	4070000	770000	0,1584	1219680	1,436E+13
7	3300000	3300000	4070000	770000	0,1346	1036420	1,436E+13
8	3800000	3300000	4070000	770000	0,1128	868560	1,436E+13
9	4070000	3300000	4070000	770000	0,0923	710710	1,436E+13
10	3300000	3300000	3800000	500000	0,0728	364000	1,436E+13
11	3300000	3300000	3800000	500000	0,054	270000	1,436E+13
12	3300000	3300000	3410000	1100000	0,0358	39380	1,436E+13
13	2690000	3300000	3300000	0	0,0178	0	1,436E+13
14	2690000	3300000	3300000	0	0	0	1,436E+13
15	5140000	3300000	3300000	0	0	0	1,436E+13
16	4070000	3410000	3300000	-1100000	0	0	7,230E+12
17	3010000	3800000	3300000	-5000000	0	0	1,467E+12
18	3800000	3800000	3300000	-5000000	0	0	1,467E+12
19	3300000	4070000	3300000	-7700000	0	0	1,530E+13
20	3410000	4070000	3300000	-7700000	0	0	1,530E+13
21	3300000	4070000	3300000	-7700000	0	0	1,530E+13
22	3300000	4070000	3300000	-7700000	0	0	1,530E+13
23	3010000	4070000	3010000	-10600000	0	0	1,530E+13
24	3010000	5140000	3010000	-21300000	0	0	2,135E+14
25	5140000	5140000	3010000	-21300000	0	0	2,135E+14
26	5140000	5140000	2690000	-24500000	0	0	2,135E+14
27	4070000	5140000	2690000	-24500000	0	0	2,135E+14
Suma:					34514050	1,41395E+15	

Para finalizar se obtiene un valor de 0,842 para el coeficiente W de Shapiro-Wilks realizado por medio de la ecuación 4.66. De acuerdo a la tabla de Niveles de significancia para el contraste de Shapiro-Wilks dado en [27] el nivel máximo de error para 27 datos y un nivel de significancia de 0.05 es de 0.923, lo que quiere decir que la muestra de módulos de elasticidad óptimos no se ajusta a una distribución normal para el método de bondad de ajuste de Shapiro-Wilks

12.1.2. Prueba Kolmogorov - Smirnov

A continuación se procede a realizar la prueba de bondad de Ajuste de Kolmogorov-Smirnov que busca medir el grado de correspondencia que presentan los datos de módulo de elasticidad óptimos y una distribución específica. En este caso se trabajó con 4 diferentes distribuciones: Normal, LogNormal, Gamma y Beta.

Distribución Normal

En primer lugar se realiza la verificación para la distribución normal de los datos de módulos de elasticidad óptimos. Como se puede ver en el Cuadro 12.2 se inicia calculando la distribución acumulativa $G_n(x)$ para 27 datos utilizando la ecuación 4.68; por otro lado, se obtienen los valores de X a partir de la ecuación 4.69 teniendo en cuenta que se trabajó con unos valores de media de 36788888,9 y una desviación estándar de 7374453,48 esto se realiza con el fin de conocer la distancia a la cual se encuentra el valor de módulo de elasticidad de la media; Posteriormente, se evalúa la función de distribución de probabilidad acumulada $G(X)$ aplicando en este caso la distribución normal de los valores de X anteriormente calculados. Para finalizar se aplica la ecuación 4.67 y se obtienen los valores de D_n y D_{n-1} para conocer la distribución que presenta cada dato de la muestra 4.67.

Cuadro 12.2: Distribución Normal Prueba de Kolmogorov-Smirnov

k	E(kpa)	Gn(X)	X	G(X)	Dn	Dn-1
1	26900000	0,0370	-1,3410	0,0900	0,0529	0,0900
2	26900000	0,0741	-1,3410	0,0900	0,0159	0,0529
3	30100000	0,1111	-0,9070	0,1822	0,0711	0,1081
4	30100000	0,1481	-0,9070	0,1822	0,0340	0,0711
5	30100000	0,1852	-0,9070	0,1822	0,0030	0,0340
6	33000000	0,2222	-0,5138	0,3037	0,0815	0,1185
7	33000000	0,2593	-0,5138	0,3037	0,0444	0,0815
8	33000000	0,2963	-0,5138	0,3037	0,0074	0,0444
9	33000000	0,3333	-0,5138	0,3037	0,0296	0,0074
10	33000000	0,3704	-0,5138	0,3037	0,0667	0,0296
11	33000000	0,4074	-0,5138	0,3037	0,1037	0,0667
12	33000000	0,4444	-0,5138	0,3037	0,1407	0,1037
13	33000000	0,4815	-0,5138	0,3037	0,1778	0,1407
14	33000000	0,5185	-0,5138	0,3037	0,2148	0,1778
15	33000000	0,5556	-0,5138	0,3037	0,2519	0,2148
16	34100000	0,5926	-0,3646	0,3577	0,2349	0,1979
17	38000000	0,6296	0,1642	0,5652	0,0644	0,0274
18	38000000	0,6667	0,1642	0,5652	0,1014	0,0644
19	40700000	0,7037	0,5304	0,7021	0,0016	0,0354
20	40700000	0,7407	0,5304	0,7021	0,0387	0,0016
21	40700000	0,7778	0,5304	0,7021	0,0757	0,0387
22	40700000	0,8148	0,5304	0,7021	0,1127	0,0757
23	40700000	0,8519	0,5304	0,7021	0,1498	0,1127
24	51400000	0,8889	1,9813	0,9762	0,0873	0,1244
25	51400000	0,9259	1,9813	0,9762	0,0503	0,0873
26	51400000	0,9630	1,9813	0,9762	0,0133	0,0503
27	51400000	1,0000	1,9813	0,9762	0,0238	0,0133

A partir de los datos de D_n y D_{n-1} del anterior Cuadro se obtiene que 0,2518 es el error máximo de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov, este valor se compara con un nivel máximo de error de 0,25438 dado por la tabla del Test de Kolmogorov Smirnov [27] para 27 datos y un nivel de significancia de 0.05.

Como se puede ver el valor máximo de la prueba bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov es menor al valor del nivel máximo de error cumpliendo con lo establecido en la ecuación 4.70, evidenciando que la muestra es puede ajustarse a una distribución normal.

Distribución LogNormal:

Continuando, se realiza la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov por medio de una distribución LogNormal; en este caso el procedimiento para el cálculo de las variables $G_n(x)$ y X es mismo al explicado anteriormente en la distribución Normal exceptuando que para este caso los valores de media y desviación estándar serían 17,403 y 0,189 respectivamente. Por otro lado la función de distribución de probabilidad acumulada $G(X)$ para los valores de X estaría dada por una distribución logNormal. Para finalizar los datos de D_n y D_{n-1} una distribución log normal se podrán evidenciar en el cuadro 12.3.

Por medio de los Datos de D_n y D_{n-1} se obtuvo un error máximo de 0,2397 el cual es menor a 0,25438 que es el nivel máximo de error; por lo tanto se cumple con lo establecido en la ecuación 4.70, evidenciando que la muestra es logNormal.

Cuadro 12.3: Distribución LogNormal Prueba de Kolmogorov-Smirnov

k	E(kpa)	Gn(X)	X	G(X)	Dn	Dn-1
1	26900000	0,037	1,420,E+08	0,060	0,023	0,060
2	26900000	0,074	1,420,E+08	0,060	0,015	0,023
3	30100000	0,111	1,589,E+08	0,167	0,056	0,093
4	30100000	0,148	1,589,E+08	0,167	0,019	0,056
5	30100000	0,185	1,589,E+08	0,167	0,018	0,019
6	33000000	0,222	1,742,E+08	0,316	0,094	0,131
7	33000000	0,259	1,742,E+08	0,316	0,057	0,094
8	33000000	0,296	1,742,E+08	0,316	0,020	0,057
9	33000000	0,333	1,742,E+08	0,316	0,017	0,020
10	33000000	0,370	1,742,E+08	0,316	0,055	0,017
11	33000000	0,407	1,742,E+08	0,316	0,092	0,055
12	33000000	0,444	1,742,E+08	0,316	0,129	0,092
13	33000000	0,481	1,742,E+08	0,316	0,166	0,129
14	33000000	0,519	1,742,E+08	0,316	0,203	0,166
15	33000000	0,556	1,742,E+08	0,316	0,240	0,203
16	34100000	0,593	1,800,E+08	0,380	0,213	0,176
17	38000000	0,630	2,006,E+08	0,605	0,025	0,012
18	38000000	0,667	2,006,E+08	0,605	0,062	0,025
19	40700000	0,704	2,149,E+08	0,735	0,031	0,068
20	40700000	0,741	2,149,E+08	0,735	0,006	0,031
21	40700000	0,778	2,149,E+08	0,735	0,043	0,006
22	40700000	0,815	2,149,E+08	0,735	0,080	0,043
23	40700000	0,852	2,149,E+08	0,735	0,117	0,080
24	51400000	0,889	2,714,E+08	0,969	0,080	0,117
25	51400000	0,926	2,714,E+08	0,969	0,043	0,080
26	51400000	0,963	2,714,E+08	0,969	0,006	0,043
27	51400000	1,000	2,714,E+08	0,969	0,031	0,006

Distribución Gamma

Para la distribución gamma de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov Smirnov se tuvo en cuenta que la distribución de probabilidad acumulada $G(X)$ estaría dada por una distribución Gamma en donde el valor de X se expresaría como el módulo de elasticidad dado en GPa. Para esta distribución se debe tener en cuenta valores como el limite inferior de 26900000 y un limite superior de 51400000, además de variables como Alfa=5,0125 y Beta=7,8558 los cuales fueron calibrados para dar la diferencia más pequeña al nivel máximo de error. Por otro lado la distribución acumulativa $Gn(x)$ se realizó a partir de la ecuación 4.68; estas dos distribuciones se aplican para la ecuación 4.67 obteniendo el valor de Dn para la distribución Gamma como se puede ver en el cuadro 12.4.

Cuadro 12.4: Distribución Gamma Prueba de Kolmogorov-Smirnov

k	E(kpa)	E (Gpa)	Gn(X)	G(X)	Dn	Dn-1
1	26900000	26,9	0,037	0,258	0,221	0,258
2	26900000	26,9	0,074	0,258	0,184	0,221
3	30100000	30,1	0,111	0,336	0,225	0,262
4	30100000	30,1	0,148	0,336	0,188	0,225
5	30100000	30,1	0,185	0,336	0,151	0,188
6	33000000	33,0	0,222	0,408	0,186	0,223
7	33000000	33,0	0,259	0,408	0,149	0,186
8	33000000	33,0	0,296	0,408	0,112	0,149
9	33000000	33,0	0,333	0,408	0,075	0,112
10	33000000	33,0	0,370	0,408	0,038	0,075
11	33000000	33,0	0,407	0,408	0,001	0,038
12	33000000	33,0	0,444	0,408	0,036	0,001
13	33000000	33,0	0,481	0,408	0,073	0,036
14	33000000	33,0	0,519	0,408	0,111	0,073
15	33000000	33,0	0,556	0,408	0,148	0,111
16	34100000	34,1	0,593	0,435	0,157	0,120
17	38000000	38,0	0,630	0,528	0,101	0,064
18	38000000	38,0	0,667	0,528	0,138	0,101
19	40700000	40,7	0,704	0,588	0,115	0,078
20	40700000	40,7	0,741	0,588	0,152	0,115
21	40700000	40,7	0,778	0,588	0,189	0,152
22	40700000	40,7	0,815	0,588	0,226	0,189
23	40700000	40,7	0,852	0,588	0,263	0,226
24	51400000	51,4	0,889	0,779	0,109	0,072
25	51400000	51,4	0,926	0,779	0,146	0,109
26	51400000	51,4	0,963	0,779	0,184	0,146
27	51400000	51,4	1,000	0,779	0,221	0,184

Por medio de los Datos de Dn y Dn-1 se obtuvo un error máximo de 0,26343 el cual es mayor a 0,25438 que es el nivel máximo de error dado por [27] concluyendo que los datos de módulos de elasticidad óptimos no se ajustan a una distribución Gamma.

Distribución Beta

Por ultimo en la distribución de la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov se tuvo en cuenta que G(X) estaría dada por una distribución Beta para el valor el módulo de elasticidad dado en Kpa. Para esta distribución las variables Alfa y Beta serán iguales a 3,0799 y 5,9829 respectivamente. De igual manera, la distribución acumulativa Gn(x) se realizó a partir de la ecuación 4.68; estas dos distribuciones se aplican para la ecuación 4.67 obteniendo el valor de Dn para la distribución Beta como se puede ver en el cuadro 12.5.

Cuadro 12.5: Distribución Beta Prueba de Kolmogorov-Smirnov

k	E (kpa)	Gn(X)	G(X)	Dn	Dn-1
1	26900000	0,037	0,000	0,037	0,000
2	26900000	0,074	0,000	0,074	0,037
3	30100000	0,111	0,068	0,043	0,006
4	30100000	0,148	0,068	0,080	0,043
5	30100000	0,185	0,068	0,117	0,080
6	33000000	0,222	0,302	0,080	0,117
7	33000000	0,259	0,302	0,043	0,080
8	33000000	0,296	0,302	0,006	0,043
9	33000000	0,333	0,302	0,031	0,006
10	33000000	0,370	0,302	0,068	0,031
11	33000000	0,407	0,302	0,105	0,068
12	33000000	0,444	0,302	0,142	0,105
13	33000000	0,481	0,302	0,179	0,142
14	33000000	0,519	0,302	0,216	0,179
15	33000000	0,556	0,302	0,253	0,216
16	34100000	0,593	0,415	0,178	0,141
17	38000000	0,630	0,773	0,143	0,180
18	38000000	0,667	0,773	0,106	0,143
19	40700000	0,704	0,918	0,214	0,251
20	40700000	0,741	0,918	0,177	0,214
21	40700000	0,778	0,918	0,140	0,177
22	40700000	0,815	0,918	0,103	0,140
23	40700000	0,852	0,918	0,066	0,103
24	51400000	0,889	1,000	0,111	0,148
25	51400000	0,926	1,000	0,074	0,111
26	51400000	0,963	1,000	0,037	0,074
27	51400000	1,000	1,000	0,000	0,037

Por medio de los datos de Dn y Dn-1 se obtuvo un error máximo de 0,2533 para la distribución Beta el cual es menor a 0,25438 que es el nivel máximo de error concluyendo que los datos de módulos de elasticidad óptimos se ajustan a esta distribución.

De acuerdo a los resultados de las cuatro distribuciones analizadas para la prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov- Smirnov se obtuvo que la función lognormal es la que se ajusta más a los datos de módulo de elasticidad debido a que fue la que presento menor error.

12.2. INTERVALOS DE CONFIANZA

Debido a que el promedio no debería ser un término fundamentado en una sola muestra pero si ajustado a toda una población, se desea conocer cuál es la probabilidad de que el promedio de los 27 datos de módulos de elasticidad óptimos se

puedan establecer dentro de un rango de valores; para esto se establecen intervalos de confianza donde se calcula el margen en el cual pueda estar el promedio de datos de módulo de elasticidad de diferentes muestras.

El primer paso a seguir para obtener estos intervalos de confianza, es calcular el porcentaje de probabilidad necesario para adquirir el valor del área de la curva para una distribución normal $Z_{\alpha/2}$. Para este caso se trabajó con un valor de significancia de $\alpha = 0,05$ obteniendo un porcentaje igual a 0.975. Este valor es buscado en la tabla del área bajo la curva para una distribución normal obteniendo un valor de $Z_{\alpha/2}$ igual a:

$$Z_{\alpha/2} = 1,96 \quad (12.1)$$

Posteriormente se obtiene que los valores del cuadro 11.4 presentan un valor de la media de 36788888,9 kPa y una desviación estándar de 7374453,48; estos valores son aplicados a la fórmula 4.76 con el fin de obtener el valor de σ^{em} igual a:

$$\sigma_m^e = 7374453,48 \quad (12.2)$$

De igual manera, se obtiene el valor de μ_m^e por medio de la ecuación 4.78 teniendo en cuenta que los valores de m^* y μ_m son iguales a la media muestral.

$$\mu_m^e = 36788888,89 \quad (12.3)$$

Para finalizar por medio de los valores de μ_m^e , σ_m^e y $Z_{\alpha/2}$ se obtiene los límites (inferior y superior) para módulos de elasticidad modificados dados en las formulas 4.79 y 4.80.

$$\text{Limite Inferior} = 33954240,23 \text{Kpa} \quad (12.4)$$

$$\text{Limite Superior} = 39623537,55 \text{Kpa} \quad (12.5)$$

Estos resultados son dados para un 95 % de probabilidad de certeza.

Capítulo 13

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a lo expuesto anteriormente en esta investigación, se identificaron 7 concretos modificados los cuales influenciaron de forma positiva a la disminución del potencial de calentamiento Global (GWP) ya que al ser aplicados a pórticos 2d se obtuvo como resultado un ahorro del 36.26 % para el pórtico de tres pisos del 34.24 % para el pórtico de seis pisos y del 36.06 % para el pórtico de nueve pisos.

A pesar de que la combinación de concreto modificado compuesta por $FA_0 F_0 C_{0SP}$ se encuentra dentro de las óptimas para esta investigación, no resulta ser apropiada para ser aplicada debido a que genera un gasto mayor de GWP inclusive que el producido por el concreto convencional. Es recomendable para futuras investigaciones buscar otras alternativas que remplacen a este concreto modificado, pues como solo tiene presencia en vigas no proporciona rigidez al desplazamiento como lo hacen las columnas.

Se recomienda para futuras investigaciones aumentar el número de muestras de concretos modificados, con el fin de obtener un número mayor de combinaciones que puedan ser utilizados quizás en pórticos que tengan un mayor número de pisos y logren un mejor resultado en cuanto a la disminución del potencial de calentamiento global GWP que se genera por el concreto estándar. Así mismo es recomendable buscar diferentes alternativas de concreto modificado que presenten un módulo de elasticidad dentro de los intervalos de confianzas establecidos en esta investigación, esto con el fin de avanzar en la investigación para la disminución de GWP por medio de concretos modificados.

Bibliografía

- [1] R. Kurda and J. D. Brito, “A comparative study of the mechanical and life cycle assessment of high-content fly ash and recycled aggregates concrete,” vol. 29, no. December 2019, 2020.
- [2] S. PATTERSON, “GROWING BRICKS AND MORE WAYS TO SHRINK CONCRETE’S CARBON FOOTPRINT,” *The Wall Steet Journal*, 2020.
- [3] L. Rodgers, “La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías,” *BBC News*, 2018.
- [4] E. L. Pereira, A. L. de Oliveira Junior, and A. G. Fineza, “Optimization of mechanical properties in concrete reinforced with fibers from solid urban wastes (PET bottles) for the production of ecological concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 149, pp. 837–848, 2017.
- [5] J. F. Brotchie, “Optimization and robustness of structural engineering systems,” *Engineering Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 289–292, 1997.
- [6] W. M. Jenkins, “On the application of natural algorithms to structural design optimization,” *Engineering Structures*, vol. 19, no. 4, pp. 302–308, 1997.
- [7] Y. H. Lin, Y. Y. Tyan, T. P. Chang, and C. Y. Chang, “An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates,” *Cement and Concrete Research*, vol. 34, no. 8, pp. 1373–1380, 2004.
- [8] W. Wang, R. Zmeureanu, and H. Rivard, “Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization,” *Building and Environment*, vol. 40, no. 11, pp. 1512–1525, 2005.
- [9] J. S. Damtoft, J. Lukasik, D. Herfort, D. Sorrentino, and E. M. Gartner, “Sustainable development and climate change initiatives,” *Cement and Concrete Research*, vol. 38, no. 2, pp. 115–127, 2008.
- [10] I. Paya-Zaforteza, V. Yepes, A. Hospitaler, and F. González-Vidoso, “CO2-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing,” *Engineering Structures*, vol. 31, no. 7, pp. 1501–1508, 2009.
- [11] D. P. Bentz, A. S. Hansen, and J. M. Guynn, “Optimization of cement and fly ash particle sizes to produce sustainable concretes,” *Cement and Concrete Composites*, vol. 33, no. 8, pp. 824–831, 2011.

- [12] D. Yeo and R. D. Gabbai, “Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 8, pp. 2028–2033, 2011.
- [13] C. V. Camp and A. Assadollahi, “CO₂ and cost optimization of reinforced concrete footings using a hybrid big bang-big crunch algorithm,” *Structural and Multidisciplinary Optimization*, vol. 48, no. 2, pp. 411–426, 2013.
- [14] T. Proske, S. Hainer, M. Rezvani, and C. A. Graubner, “Eco-Friendly Concretes With Reduced Water and Cement Content: Mix Design Principles and Experimental Tests,” *Handbook of Low Carbon Concrete*, vol. 51, pp. 63–87, 2013.
- [15] G. F. de Medeiros and M. Kripka, “Optimization of reinforced concrete columns according to different environmental impact assessment parameters,” *Engineering Structures*, vol. 59, pp. 185–194, 2014.
- [16] Jane Margolies, “Concrete, a Centuries-Old Material, Gets a New Recipe,” *The New York Times*, 2020.
- [17] C. A. Reyna Pari, “Reutilización de Plástico Pet, Papel y Bagazo de Caña de Azúcar, como materia prima en la Elaboración de Concreto Ecológico para la Construcción de Viviendas de bajo costo,” *Lexus*, no. None, p. 70, 2016.
- [18] C. Mauricio Bedoya-Montoya, “Sustainable house construction with soil cement blocks: From waste to material,” *Revista De Arquitectura*, vol. 20, no. 1, pp. 62–70, 2018.
- [19] Mariette DiChristina, “Low-Carbon Cement Can Help Combat Climate Change,” *Scientific American*, 2020.
- [20] J. Bautista and N. Loaiza, “La Construcción Sostenible Aplicada a Las Viviendas De Interés Social En Colombia,” *Boletín Semillas Ambientales*, vol. 11, no. 1, pp. 86–110, 2017.
- [21] H. Acevedo Agudelo, A.ásquez Hernández@, and D. A. Ramirez Cardona, “Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia,” *Revista Gestion y Ambiente*, vol. 15, no. 1, pp. 105–118, 2012.
- [22] Y. C. Yoon, K. H. Kim, S. H. Lee, and D. Yeo, “Sustainable design for reinforced concrete columns through embodied energy and CO₂ emission optimization,” *Energy and Buildings*, vol. 174, pp. 44–53, 2018.
- [23] R. Storn and K. Price, “Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces,” *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, 1997.
- [24] S. Kiranyaz, “Particle swarm optimization,” *Adaptation, Learning, and Optimization*, vol. 15, pp. 45–82, 2014.

- [25] R. Eberhart and J. Kennedy, “A New Optimizer Using Particle Swarm Theory,” pp. 39–43, 1995.
- [26] F. Y. Cheng, *Matrix Analysis of Structural Dynamics: Applications and Earthquake Engineering*. Civil and Environmental Engineering, CRC Press, 2017.
- [27] J. Serra, “Tablas estadísticas,” *Universidad de Granada*, 2002.
- [28] R.ía Bellido@, J.ález Such@, and J.á@, “Pruebas no Paramétricas. SPSS. Kolmogorov Smirnov,” *Grupo de innovacion Educativa. Universidad de Valencia*, pp. 1–5, 2010.
- [29] R. Simard and P. L’Ecuyer, “Computing the Two-Sided Kolmogorov-Smirnov Distribution,” *Journal of Statistical Software*, vol. 1, no. 1, pp. 128–129, 2011.
- [30] G. Runger and D. Montgomery, *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 5 ed., 2011.
- [31] A. S. Nowak and K. R. Collins, *Reliability of Structures*. McGraw-Hill civil engineering series, McGraw-Hill, 2000.
- [32] L. Taiz and E. Zeiger, *Fisiologia vegetal*. Ciencias experimentals/ Experimental Sciences, Universitat Jaume I, 2006.
- [33] M. Sánchez-Silva and C. Gómez, “Risk assessment and management of civil infrastructure networks: A systems approach,” in *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*, pp. 437–464, Elsevier Inc., apr 2013.
- [34] G.áceres, Samuel Belizario Quispe@, “Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento,” *evista de Investigaciones Altoandinas*, 2018.
- [35] B. Lu, C. Shi, J. Zheng, and T. C. Ling, “Carbon dioxide sequestration on recycled aggregates,” in *Carbon Dioxide Sequestration in Cementitious Construction Materials*, pp. 247–277, Elsevier, jan 2018.
- [36] J. Martin, “Glasses and ceramics,” in *Materials for Engineering*, pp. 133–158, Elsevier, jan 2006.
- [37] P. C. Nkinamubanzi, S. Mantellato, and R. J. Flatt, “Superplasticizers in practice,” in *Science and Technology of Concrete Admixtures*, pp. 353–377, Elsevier Inc., jan 2016.
- [38] A. Ramos, P. Sanchez, J. M. Ferrer, J. Barquin, and P. Linares, “Modelos Matematicos De Optimización,” *Pdf*, vol. 2, p. 55, 2010.
- [39] H. Lu, J. Chen, and L. Guo, “Energy Quality Management,” in *Comprehensive Energy Systems*, vol. 5-5, pp. 258–314, Elsevier Inc., feb 2018.

- [40] N. Tošić, S. Marinković, T. Dašić, and M. Stanić, “Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 87, no. 1, pp. 766–776, 2015.
- [41] H. Dilbas, Ö. Çakır, and H. Yıldırım, “Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method,” *Construction and Building Materials*, vol. 252, pp. 716–726, 2019.
- [42] Ö. Çakır and H. Dilbas, “Durability properties of treated recycled aggregate concrete: Effect of optimized ball mill method,” *Construction and Building Materials*, vol. 268, 2021.
- [43] S. R. Salimbahrami and R. Shakeri, “Experimental investigation and comparative machine-learning prediction of compressive strength of recycled aggregate concrete,” *Soft Computing*, vol. 256, 2020.
- [44] J. Feng, G. Yin, H. Tuo, and Z. Niu, “Parameter optimization and regression analysis for multi-index of hybrid fiber-reinforced recycled coarse aggregate concrete using orthogonal experimental design,” *Construction and Building Materials*, vol. 267, 2021.
- [45] R. Kurda, J. de Brito, and J. D. Silvestre, “CONCRETop method: Optimization of concrete with various incorporation ratios of fly ash and recycled aggregates in terms of quality performance and life-cycle cost and environmental impacts,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 226, pp. 642–657, 2019.
- [46] V. J. Gan, J. C. Cheng, and I. M. Lo, “Integrating life cycle assessment and multi-objective optimization for economical and environmentally sustainable supply of aggregate,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 113, pp. 76–85, 2015.
- [47] H. Islam, M. Jollands, S. Setunge, and M. A. Bhuiyan, “Optimization approach of balancing life cycle cost and environmental impacts on residential building design,” *Energy and Buildings*, vol. 87, pp. 282–292, 2015.
- [48] M. Moini, I. Flores-Vivian, A. Amirjanov, and K. Sobolev, “The optimization of aggregate blends for sustainable low cement concrete,” *Construction and Building Materials*, vol. 93, pp. 627–634, 2015.
- [49] R. Yu, Q. Song, X. Wang, Z. Zhang, Z. Shui, and H. J. Brouwers, “Sustainable development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPC): Towards to an optimized concrete matrix and efficient fibre application,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 162, pp. 220–233, 2017.
- [50] M. Kripka, G. F. Medeiros, and A. C. Lemonge, “Use of optimization for automatic grouping of beam cross-section dimensions in reinforced concrete building structures,” *Engineering Structures*, vol. 99, pp. 311–318, 2015.
- [51] C. Zheng and M. Lu, “Optimized Reinforcement Detailing Design for Sustainable Construction: Slab Case Study,” *Procedia Engineering*, vol. 145, pp. 1478–1485, 2016.

- [52] L. H. Xu, X. T. Yan, and Z. X. Li, “Development of BP-based seismic behavior optimization of RC and steel frame structures,” *Engineering Structures*, vol. 164, no. October 2017, pp. 214–229, 2018.
- [53] J. Ferreiro-Cabello, E. Fraile-Garcia, E. Martinez de Pison Ascacibar, and F. J. Martinez de Pison Ascacibar, “Metamodel-based design optimization of structural one-way slabs based on deep learning neural networks to reduce environmental impact,” *Engineering Structures*, vol. 155, no. November 2017, pp. 91–101, 2018.
- [54] T. García-Segura and V. Yepes, “Multiobjective optimization of post-tensioned concrete box-girder road bridges considering cost, CO2 emissions, and safety,” *Engineering Structures*, vol. 125, pp. 325–336, 2016.
- [55] T. García-Segura, V. Penadés-Plà, and V. Yepes, “Sustainable bridge design by metamodel-assisted multi-objective optimization and decision-making under uncertainty,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 202, pp. 904–915, 2018.
- [56] A. R. Shooli, A. R. Vosoughi, and M. R. Banan, “A mixed GA-PSO-based approach for performance-based design optimization of 2D reinforced concrete special moment-resisting frames,” vol. 85, 2019.
- [57] Ministerio Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, “Titulo A - Requisitos Generales de Diseño y Construcción Sismo Resistente,” *Nsr-10*, vol. Titulo A, pp. 1–174, 2010.