

# **Diseño estructural de una vivienda unifamiliar de dos niveles con la implementación de una cubierta verde extensiva utilizando residuos de construcción y demolición (RCD).**

J.D. Velasco Portilla, M.A. Rojas Manzano.

*Pontificia Universidad Javeriana Cali, Santiago de Cali, Valle del Cauca, Colombia*

**ABSTRACT:** The designs of sustainable or green roofs are increasingly solicited or demanded by builders and consumers, due to the prosperous research and information available and globalized that ratifies its use, with great potential, not only in the environmental and energy sector, But also for the economic and habitual benefits for the human being.

One of the main problems in the first world countries is the loss of the natural landscape and the lack of soil for construction, since it triggers many others such as the effect of heat island, increase of the volume of runoff waters, waste management, among others . Colombia, a country with great sources of natural resources, and economic growth, does not present great problems of habitabilidad and space, but in its measure, for the conservation of the same one must adopt strategies that mitigate or brake, the problems mentioned above, to Thus, not facing irreparable future consequences. One of the strategies is the use and optimization of spaces in cities and metropolitan areas, improving living conditions, living beings and providing new spaces through the implementation of green roofs, landscaped walls, among others.

The main objective of this project was the development and design of a two-level single family structure with the implementation of an extensive green roof using Construction and Demolition Waste (RCD) as the main innovative feature, as well as a brief budget and comparative analysis Of the direct costs of the building with a conventional cover and another with extensive green cover.

The design was based on research references, made by students graduated from the Pontificia Universidad Javeriana Cali, the Colombian Resistive Earthquake Regulation, for structural design, and data binding by the International Green Roof Association.

## 1 INTRODUCCIÓN

La innovación sustentable y aprovechamiento de los recursos naturales, en gran medida constituyen beneficios que fomentan la conservación del planeta

Dada la expansión y desplazamiento de las ciudades y áreas metropolitanas, diversos problemas ambientales (efecto isla de calor, aumento del volumen de aguas de escorrentía, pérdida del paisaje natural, manejo de residuos, entre otros) se vienen presentando. Para aminorar esta situación diferentes tecnologías como lo son, las cubiertas verdes, se están consideran como una estrategia de mitigación.

Los techos verdes son estructuras diseñadas; que se conforman básicamente de capas orgánicas y membranas, con plantas en su capa superior. Según estudios recientes en donde se evaluó la interacción entre la cubiertas verdes y las edificaciones que las soportan, esta disminuyen considerablemente el consumo energético de la estructura, ya que proporcionan una barrera aislante térmica, entre la parte exterior e interior de la edificación, dando lugar a un microclima en donde las condiciones y calidad de vida de los habitantes mejora con respecto a un

techo convencional, ahora entre los multiples beneficios, tambien encontramos un incremento de vida útil del techo o cubierta, ya que la distribución de las capas que conforman los techos verdes, actúan como una barrera que modera el paso de los rayos UV emitidos por el sol, además de la degradación por cambios de clima abruptos (Bianchini,2012)

Sin embargo, los materiales comúnmente utilizados para conformar la estructura de una cubierta verde, provienen de recursos no renovables explotados directamente de la naturaleza mediante intensos procesos de transformación, consumiendo grandes cantidades de energía y generando gran impacto ambiental.

Con el ánimo de dar uso a nuevos materiales para la conformación de la cubierta verde, se consideró el agregado reciclado de construcción y demolición (RCD) como material alternativo reciclado, que se genera básicamente por la demolición de estructuras de concreto.

En esta ocasión se tiene como objeto de estudio y diseño, una vivienda unifamiliar de dos plantas, ubicada en el municipio de Jamundi, Valle del Cauca, Colombia. El proyecto se encuentra en fase de diseño

arquitectónico preliminar y se plantea la adición de una cubierta verde extensiva, que cubra toda la superficie de la vivienda, siendo funcional y estéticamente adecuada desde el punto de vista arquitectónico. Además se efectuará el debido análisis estructural, bajo las cargas adicionales impuestas por la cubierta, así como el diseño estructural de la casa para que cumpla con las condiciones de uso que exige el Reglamento sismo resistente NSR 10.

## METODOLOGÍA

La metodología empleada para este estudio y diseño, se basó en la conjunción y enlace de los atributos con los cuales se solicitaba diseñar bajo los nuevos requerimientos de la edificación.

Para el desarrollo de este proyecto fue necesario plantear un orden lógico de diseño, para así recopilar los parámetros necesarios y normas que rigen las nuevas condiciones de entrada y diseñar la estructuras, estos se presentan de la siguiente manera:

- Criterios de diseño de una cubierta verde
- Ensayos para caracterizar el comportamiento mecánico de los residuos de construcción y demolición
- Criterios de diseño estructural

### 1.1 Criterios de diseño de una cubierta verde

Para realizar el diseño de la estructura de cubierta verde, se siguieron las recomendaciones del International Green Roof Association IGRA, la cual es una organización multinacional sin ánimo de lucro que desarrolla y difunde las nuevas tecnologías para el desarrollo de cubiertas ajardinadas o verdes.

Tabla 1. Criterios para la vegetación de las cubiertas verdes (IGRA, 2014)

	Naturación extensiva	Naturación semi-intensiva	Naturación intensiva
Mantenimiento	Bajo	Periódicamente	Alto
Riego	No	Periódicamente	Regularmente
Vegetación	Hierbas y pastos	Hierbas y arbustos	Césped, arbustos y árboles
Sistema de acumulación	60 a 200 mm	120 a 250 mm	150 a 400 mm en garajes Subterráneos > 1000 mm
Peso	60 a 140 kg/m <sup>2</sup>	120 a 210 kg/m <sup>2</sup>	180 a 500 kg/m <sup>2</sup>
Costos	Bajo	Medio	Alto
Uso	Capa de protección ecológica	Techo Verde diseñado	Parque como jardín

La anterior, ver Tabla 1, muestra un resumen característico para cada tipo de vegetación, en nuestro caso la cubierta extensiva, nos proporcionó información útil para la distribución manejo y control del sistema en cuanto a su mantenimiento periódico, costos, carga impuesta y espesores de diseño.

### 1.2 Ensayos para caracterizar el comportamiento mecánico de los residuos de construcción y demolición RCD

En este apartado, para la caracterización mecánica de los residuos se tienen los siguientes ensayos y conceptos según Embus y Quintero (2015), los cuales sirvieron como información vital para el desarrollo de este proyecto, ya que se retomó la información de su tesis investigativa como testigo.

Tabla 2. Caracterización mecánica del RCD (Embus y Quintero, 2015)

Constituyente	Descripción
Resistencia a la compresión no confinada (UCS)	Este ensayo tiene como objetivo determinar la resistencia a la compresión no confinada un material granular, en este caso RCD
Índice de soporte de California (CBR)	Se define como la relación entre el esfuerzo requerido para penetrar un pistón en un cuerpo de prueba y el esfuerzo requerido para producir la misma penetración en un material de referencia.
Desgaste en la máquina de los Ángeles	Evalúa una característica física del material a la abrasión o tener un índice de calidad de los agregados
Módulo de resiliencia (MR)	Es el esfuerzo desviador repetido aplicado en un ensayo de compresión triaxial entre la deformación axial recuperable, semejante a un proceso de carga y descarga cíclica
Gravedad específica del RCD	Relaciones gravimétricas del cuerpo de prueba RCD

### 1.3 Metodología para diseño estructural de las edificaciones

El método empleado para el desarrollo de este proyecto, se basa en la caracterización y parametrización de la estructura, mediante el Reglamento Sismo Resistente y la modelación por medio del programa ETABS, el cual se fundamenta en el método de análisis por elementos finitos, cuyas expresiones se representan a partir del método de la rigidez directa, para formalizar el sistema elástico.

A continuación ver Tabla 3 se presenta en orden el método desarrollado con el cual se modelaron las estructuras para su respectiva comparación.

Tabla 3. Metodología de diseño estructural

	Descripción
Análisis de combinaciones de cargas y cargas inducidas por la cubierta verde	Las combinaciones de carga y factores de carga, deben ser usados en todos los materiales estructurales permitidos por el reglamento de diseño del material. El cálculo de las cargas actuantes sobre la estructura, se realiza utilizando las combinaciones especificadas en el NSR 10. Según el A.2.4.2
Revisión Reglamento NSR 10	Tener en cuenta la última actualización de la NSR 10, para así poder diseñar una estructura que cumpla con todos los requerimientos de los títulos A, B, C en donde se definen los requisitos generales de diseño y construcción sísmo resistente, cargas, concreto estructural y propiedades mínimas de los materiales con los cuales se deberá construir la edificación.
Sectorización sísmica	Según el Reglamento Sismo Resistente las edificaciones diseñadas en nuestro territorio se deben diseñar con base a las especificaciones del mapa de zonas de amenaza y aceleración pico efectiva al igual que su espectro de diseño y tipo de suelo conjuntamente; según el Mapa de Amenaza Sísmica, Numeral A.2.3
Análisis de las posibles alternativas de solución	Se deberá escoger el tipo de sistema estructural bajo las condiciones de servicio que desempeñara la edificación y forma dimensiones del proyecto, Según el numeral 10 A.3-3 Del NSR 10
Modelación con Software ETABS	La estructura se representara en 3 dimensiones y se procederá a darle propiedades a sus elementos y cargas de servicio impuestas según las necesidades del proyecto. Para la creación de las secciones de los elementos (vigas y columnas) se deberá tendrá en cuenta las cuantías mínimas de acero en sección por según elemento descritas en el Título C de la NSR 10.
Análisis del comportamiento seudoestático	Considerar el espectro elástico de diseño, según la sectorización sísmica y estudio de suelos, seguido del período fundamental de la estructura para luego determinar la cortante basal la cual se ajustara según las necesidades.

## 2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos tras la ejecución del diseño de cubierta verde extensiva utilizando residuos de construcción y demolición (RCD) y el diseño estructural bajo las nuevas condiciones de carga impuestas por la cubierta verde, que permiten evaluar y comparar con el diseño preliminar con cubierta convencional.

### 2.1 Diseño de cubierta verde extensiva

Para el diseño de la cubierta verde extensiva se adoptó una guía de diseño de cubiertas estadounidense de la empresa Conservation Technology especializada desde 1984 en el desarrollo de tecnología sostenible y energía renovable y el IGRA suministrando la siguiente conformación de capas, ver Tabla 4.

Tabla 4. Conformación de capas diseño cubierta verde extensiva

Capa	Descripción
1. Material de protección	Membrana de barrera de raíz y manto asfáltico.
2. Sistema de drenaje	Canalizada con aberturas (D= 1/4" @ 20 cm a lo largo del canal), inmersa en el medio granular con cajas de acceso, sobre los bajantes de la cubierta, conectados al alcantarillado pluvial.
3. Borde de retención o Angulo	Angulo soldado a puntales tipo anclaje de diámetro 1/2" @ 30 cm y profundidad de 15 cm.
4. Medio granular	RCD con espesor E= 7 cm.
5. Sustrato o suelo de plantación	Sustrato con contenido mineral común, E= 5 cm.
6. Plantación	Semilla de pasto aleatorio resistente a ahuellamiento y clima cálido.

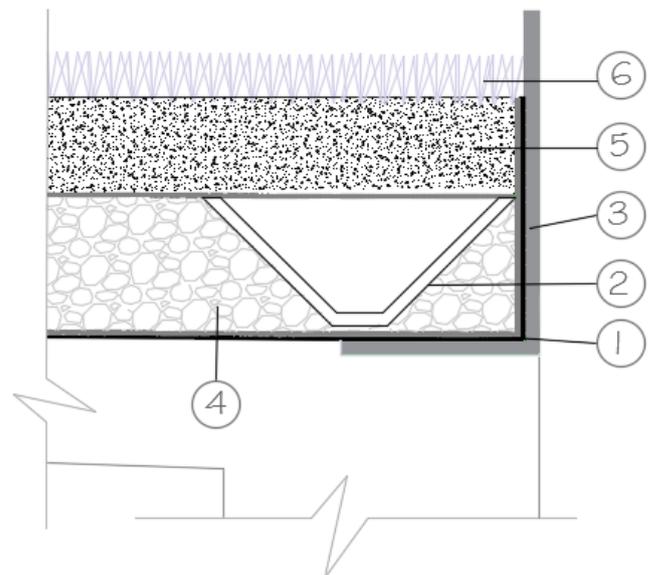


Figura 1. Corte. Conformación de capas diseño cubierta verde extensiva

El diseño de la cubierta verde ver Figura 1 y Tabla 4, cumple con los criterios de diseño en cuanto a espesores y resistencia teórica de los materiales según IGRA.

Para la caracterización física del agregado reciclado, se realizaron los ensayos convencionales para agregados naturales con base en las especificaciones INVE 300 del Instituto Nacional de Vías Embus y Quintero (2015).

De esta manera fue posible determinar que el agregado de RCD cumplió con todas las especificaciones técnicas para ser utilizado como sub-base ver Tabla

5, que estipula la norma colombiana y respectivamente reemplazar material de la capa de drenaje y medio granular de la cubierta verde extensiva.

Tabla 5. Resultados. (Embus y Quintero, 2015)

Ensayo	Valor Obtenido	Valor de referencia	
		Sub base Granular	Base Granular
Dureza en la máquina de los Ángeles	51%	≤50	≤40
Partículas delezna- bles	2-7%	≤2	≤2
Durabilidad en sulfato de sodio	1-5%	≤12	≤12
Límite líquido	35%	≤40	≤40
Equivalente de arena	76%	≥25	≥30

## 2.2 Diseño estructural

El modelo estructural se diseñó según las nuevas cargas impuestas (Cubierta verde extensivo), y se evaluó de acuerdo al sitio y uso que exige el NSR-10. Se hizo una evaluación ante cargas verticales: carga muerta, carga viva y cargas horizontales, como fuerzas sísmicas.

Se realizó el diseño estructural conforme al modelo arquitectónico. Usando el método de la resistencia última, siguiendo los requerimientos del Título A, B, y C del NSR-10, donde se multiplican las solicitaciones por los respectivos factores de mayoración de cargas y se reduce la resistencia de los materiales con los coeficientes de reducción de resistencia según sea el caso, después se hacen las combinaciones de carga.

La determinación de las fuerzas de corte, momento, fuerza axial y sus esfuerzos producidos en las diferentes secciones transversales se realizan con los programas de diseño estructural ETABS.

### Definición de materiales, elementos y cargas

Los materiales utilizados y propiedades, ver Tabla 6 para el diseño de la estructura, fueron revisados y avalados según el título C, NSR 10.

Tabla 6. Propiedades y resistencia mínima de materiales en elementos estructurales

Propiedades de los materiales	
Concreto de Vigas principales	$f'c = 21.00 \text{ Mpa}$
Concreto de Secundarias y Viguetas	$f'c = 21.00 \text{ Mpa}$
Concreto de Columnas	$f'c = 21.00 \text{ Mpa}$
Concreto Losas de Entrepiso	$f'c = 21.00 \text{ Mpa}$
Concreto de Cimentación	$f'c = 21.00 \text{ Mpa}$
Acero de Refuerzo	$Fy = 420.00 \text{ Mpa}$
Módulo de elasticidad: E	200 000 Mpa
Módulo de rigidez: G	6.903.07 Mpa

### Pre-dimensionamiento de Las vigas y losa

Para el cálculo de la altura de la losa se tomó como referencia la Tabla 11, de la NSR 10 c9.5a, la cual calcula el espesor mínimo como  $(L/16)$  para Losas Nervadas simplemente apoyadas ver Tabla 7.

Tabla 7. Alturas o espesores mínimos de vigas o losas reforzadas

	Espesor Mínimo, h			
	Simplemente Apoyados	Con Un Extremo Continuo	Ambos Extremos Continuo	En Voladizo
Elementos	Elementos Que NO Soporten O Esten Ligados A Divisiones U Otro Tipo De Elementos Susceptibles De Dañarse Debido A Deflexiones Grandes,			
Losas Macizas En Una Direccion	$\frac{L}{20}$	$\frac{L}{24}$	$\frac{L}{28}$	$\frac{L}{10}$
Vigas O Losas Nervadas En Una Direccion	$\frac{L}{16}$	$\frac{L}{18,5}$	$\frac{L}{21}$	$\frac{L}{8}$

NOTAS: Los valores dados en esta tabla se deben usar directamente en elementos de concreto de peso normal y refuerzo grado 420 Mpa, para otras condiciones, los valores deben modificarse como sigue:

$$Luz\ mas\ larga = 7m$$

$$h = \frac{7\ m}{16} = 0,438m \approx 0,45m$$

La losa aproximadamente deberá tener una altura de 0,45 m en toda su extensión este valor incluye el recubrimiento de la losa.

Se debe tener en cuenta la carga que soportan las vigas por longitud a flexión, debido al diseño arquitectónico de la estructura, se tienen diferentes longitudes de vigas y secciones.

Se obtiene  $W_u$  multiplicando la carga total por la longitud aferente de la viga crítica y se le suma el peso propio mayorado de la viga, ver ecuación 1.

$$W_u = CT L_{aferent} + 1,2 PP \quad (1)$$

$$\phi M_n > Mu \quad (2)$$

Para este pre-dimensionamiento, se hará uso de la NSR-10 C.13.5.5 Análisis aproximado para losas en una dirección, esto se deberá cumplir para las vigas principales, secundarias y viguetas, ver ecuación 2

$$Mu = \frac{wl^2}{n} \quad (3)$$

Ahora bien, se debe realizar el chequeo del momento máximo para cada viga de dimensiones dadas mediante la ecuación 4 y cumplir la condición de la ecuación 2.

$$\phi Mn = \phi \rho b d^2 f_y \left( 1 - 0,59 \frac{\rho f_y}{f'_c} \right) \quad (4)$$

En la siguiente, ver Tabla se muestra las secciones propuestas en primera instancia de las vigas y viguetas y se efectúa el chequeo del momento nominal respecto al momento último según las cargas impuestas

Tabla 8. Pre dimensionamiento de vigas con chequeo de momentos

Elemento	Sección propuesta	Mu	MN	MN>Mu
Viga principal	40x45	294,0	297.2	Cumple
Viga secundaria	25x45	140,8	140,8	Cumple
Viguetas	10x35	19,2	31,7	Cumple

Las columnas se deberán diseñar con la cuantía y secciones mínimas de diseño exigidos por la NSR 10, siendo el 2% de acero y una sección de 35 x 35.

### Análisis dinámico

La amenaza o peligrosidad sísmica del sitio se define normalmente mediante espectros de diseño, en este caso para el municipio de Jamundí, Valle del Cauca, zona con alta predisposición sísmica, sale de los linderos del abanico de la microzonificación Colombiana, entonces se deberá diseñar de acuerdo con el NSR 10. Los parámetros para el espectro de diseño quedan determinados de la siguiente manera ver Tabla 9 y 10.

Tabla 9. Análisis de espectro elástico según la norma (NSR 10)

Datos De Proyecto	
Aa	0,25
Av	0,25
I	1
SUELO	D
Fa	1,3
Fv	1,9
Tc	0,7
Ti	4,56

Tabla 10. Parámetros y periodo fundamental estructura, espectro elástico según la norma (NSR 10)

H(m)	Ct	$\alpha$	Ta
6	0,047	0,9	0,23574038

Una vez obtenido el periodo fundamental de la estructura mediante la norma NSR 10, se procede a realizar el espectro elástico de diseño, ver Figura 2 a continuación.

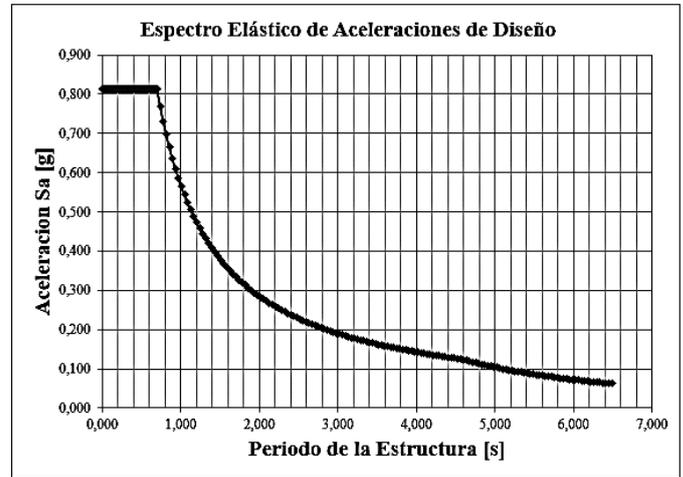


Figura 2. Espectro de diseño

### Análisis Modal Espectral Usando Parámetros de la NSR 10 y derives.

Del modelo matemático empleado por el software de diseño estructural, se presenta a continuación, ver Tabla 11, la participación modal considerada para la estructura con un número de 9 modos de vibración

Tabla 11. Parámetros y periodo fundamental estructura, espectro elástico según la norma (NSR 10)

Case	Modo	Periodo Sec	UX	UY	Sum UX	Sum UY
Modal	1	<b>0,306</b>	0,903	0	0,903	0,000
Modal	2	<b>0,301</b>	0	0,927	0,903	0,927
Modal	3	0,250	0,022	0	0,925	0,927
Modal	4	0,116	0,073	0	0,998	0,927
Modal	5	0,114	0	0,073	0,998	1,000
Modal	6	0,094	0,002	0	1,000	1,000
Modal	7	0,013	0	0	1,000	1,000
Modal	8	0,012	0	0	1,000	1,000
Modal	9	0,011	0	0	1,000	1,000
Modal	10	0,010	0	0	1,000	1,000
Modal	11	0,010	0	0	1,000	1,000
Modal	12	0,009	0	0	1,000	1,000

Se alcanzó con 2 modos más del 90% de la masa de la edificación, tanto en la dirección X como Y, cumpliendo con lo estipulado en la NSR 10.

Para la verificación por desplazamiento horizontal se chequea que el edificio cumpla con el requisito de las derivas, es decir, que estas sean menores que el 1% para edificios de menos de 3 pisos según NSR 10. En la siguiente Tabla 12, se muestran las derivas para la estructura de cubierta verde en el sentido X y Y, teniendo en cuenta el Sismo en X y Y máximo.

Tabla 12. Derivas edificación con cubierta verde según ETABS

Story	Load Case/Combo	Dirección	Deriva
Story1	SismoX Max	X	0,0049
Story2	SismoX Max	X	0,0044
Story1	SismoY Max	Y	0,0043
Story2	SismoY Max	Y	0,0038
Story1	SismoX Max	Y	0,0008
Story2	SismoX Max	Y	0,0007

## Secciones calculadas

El modelo tuvo un buen comportamiento estático y dinámico ya que su forma y geometría es regular, ahora el incremento de carga inducida por la cubierta verde no conlleva a cambios drásticos de sección, como podemos analizar en la Tabla 13, solo los elementos viga 4 y 5 cambiaron su sección en cuanto a su base,

La cuantía del acero necesario arrojada para la estructura de cubierta verde, se ratificó mediante los aceros mínimos y máximos según el NSR 10 y chequeo a mano, cumpliendo con los requerimientos necesarios para su respectivo despiece estructural en planos.

Tabla 13. Secciones calculadas edificación con cubierta verde y cubierta convencional

Elementos	Resistencia del concreto $f_c$ ( Mpa)	Dimensiones	
		C.V.	C.C.
Vigas de cimentación	3000	30x40	30x40
Viga 1	3000	40x45	40x45
Viga 2	3000	40x45	40x45
Viga 3	3000	25x45	25x45
Viga 4	3000	40x45	25x40
Viga 5	3000	40x45	25x40
Viga 6	3000	25x45	25x45
Viguetas	3000	10x35	10x35
Columnas	3000	35x35	35x35
Recubrimiento losa 1	3000	0.05 m	0.05 m
Recubrimiento losa 2	3000	0.05 m	-

## 3 CONCLUSIONES

A continuación se listan las principales conclusiones y recomendaciones del artículo.

El diseño estructural y la evaluación de cargas de las viviendas, planteadas según la NSR 10, con los dos tipos de cubierta, arrojó diferencias en los resultados como el aumento de las secciones en vigas principales, secundarias y cuantías de acero. Este comportamiento se debe al incremento de cargas generado por la estructura que conforma la cubierta verde, en comparación con la cubierta convencional. Cabe decir que las diferencias esperadas fueron mínimas, ya que la forma regular de la edificación no afectó en gran medida el comportamiento estructural y dinámico de la vivienda, tras haber cambiado el centro de masa de la edificación, con el cambio del diseño inicial.

El diseño de la cubierta verde cumplió con las recomendaciones del IGRA, y puede concluirse que el uso del agregado tipo RCD, como medio de drenaje y filtro, se mostró como una alternativa técnica y ambientalmente viable para la construcción de este tipo de cubiertas. La caracterización mecánica del RCD elaborada por Embus y Quintero (2015), comprobó la resistencia a las cargas axiales cíclicas de servicio impuestas en una estructura de pavimento, por lo tanto la utilización de este material como capa participativa de la cubierta verde se considera como apta.

A continuación se presentan recomendaciones para trabajos futuros

En cuanto al análisis estructural, se recomienda implementar los diseños en estructuras con un número de pisos mayor a la diseñada en este proyecto, y que además cuente con irregularidades en su forma, donde posiblemente se tendría que utilizar otro tipo de sistema estructural, para así evaluar los efectos y comportamiento estático y pseudoestático, tras la interacción de nuevas cargas impuestas sobre la estructura con cubierta verde.

## 4 REFERENCIAS

Bianchini, F., & Hewage, K., (2012). *How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials*. Building and Environment, 57-65.

Embus, D., Quintero, L. (2015). Influencia del contenido de humedad en el comportamiento mecánico de un residuo de construcción y demolición (RCD) como material de la estructura del pavimento. PUJ.Cali.

IGRA., (2014). International Green Roof Association. Obtenido de IGRA: <http://www.igra-world.com/>

INVIAS - Artículo 300-07. Disposiciones generales para la ejecución de afirmados, subbases granulares y bases granulares y estabilizadas.

Normas Colombianas de Diseño Sismo resistente, NSR-10, Título A, B, C (2016).