

Evaluación del comportamiento sísmico de viviendas de estratos marginales con cubiertas verdes: estudio de caso del municipio de Soacha, Colombia

Seismic behavior assessment in vulnerable housing with green roofs: case study in the township of Soacha, Colombia

Luisa Olaya*, Diego Rubio*, Daniel Ruiz¹*, Andrés Torres*

* Pontificia Universidad Javeriana. COLOMBIA

Fecha de Recepción: 16/01/2014
Fecha de Aceptación: 01/03/2014
PAG 98-114

Resumen

El grupo de investigación *Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente* y *PROSOFI* (Programa Social de la Facultad de Ingeniería) de la Pontificia Universidad Javeriana propusieron para viviendas de población socialmente vulnerable la construcción de techos verdes que se basan en cubrir parte de la cubierta de las viviendas con vegetación potencialmente productiva. Teniendo en cuenta que la masa inercial de las cubiertas verdes puede incrementar la vulnerabilidad sísmica de las viviendas; el grupo de investigación *ESTRUCTURAS* y *CONSTRUCCIÓN* realizó un análisis estructural (con enfoque sísmico) de la vivienda que se ha usado como prueba piloto de este tipo de cubiertas verdes. Se realizó un estudio de dinámica estructural de la vivienda con acelerómetros sísmicos y con modelaciones por elementos finitos. Los resultados sugieren que la vulnerabilidad sísmica de la edificación se incrementó con la presencia del techo verde ya que la distorsión de entrepiso creció un 62% y los esfuerzos máximos se aumentaron en un 241%; no obstante estos incrementos no son peligrosos para la estabilidad y funcionalidad de la casa prefabricada.

Palabras claves: Techos verdes, análisis dinámico, comportamiento sísmico, vulnerabilidad sísmica

Abstract

The research group *Science and Engineering of Water and the Environment and Social Program of the Faculty of Engineering (PROSOFI)* of the Pontificia Universidad Javeriana proposed, for socially vulnerable population, green roofs based on covering the rooftop of houses with potentially productive vegetation. Taking into account that the inertial mass of the green roof could increase the seismic vulnerability of the house, the research group *STRUCTURES* and *CONSTRUCTION* performed a seismic structural analysis on the house used as a pilot test for this type of green roofs. A structural dynamic analysis of the building was performed with seismic accelerometers and finite element modeling. Results suggest that the seismic vulnerability of the building was increased by the presence of the green roof as the seismic interstory drift grew 62% and maximum stresses increased by 241%; nevertheless, these increases do not endanger the stability and functionality of the house.

Keywords: Green roofs, dynamic analysis, seismic behavior, seismic vulnerability

1. Introducción y justificación

En Colombia el desplazamiento forzado como consecuencia de desastres ambientales, conflictos armados y otros factores económicos, sociales y políticos ha dejado un total de 5'445.406 personas afectadas entre los años 1985 y 2012 (CODHES, 2012). Bogotá D.C al ser la capital y centro económico y político del país atrae gran parte de esta población vulnerable. Según (CODHES, 2012) cerca de 41.246 personas ingresaron al Distrito Capital en el año 2011 por causa del desplazamiento, lo cual significa que aproximadamente 114 personas ingresaron diariamente. Adicionalmente, la insuficiente política estatal en cuanto a ayudas económicas y suministro de viviendas dignas y seguras, ha fomentado urbanizaciones no autorizadas en lugares de alto riesgo y construidas sin cumplir ningún requisito técnico, con materiales como mampostería no confinada, sistemas prefabricados no avalados por la Normativa Sismo Resistente, madera e incluso latones. En la gran mayoría de los casos ese tipo de edificaciones son sísmicamente vulnerables.

1. Introduction and justification

In Colombia, forced relocation as a consequence of environmental disasters, armed conflicts and other economic, social and political factors have resulted in a total of 5,445,406 affected people between 1985 and 2012 (CODHES, 2012). Being Bogota D.C. the country's capital city and the economic and political center, it attracts most of this vulnerable population. According to (CODHES, 2012), nearly 41,246 people came to the Capital District in 2011 as a consequence of relocation, which means approximately 114 people per day. Additionally, the inadequate government policy concerning economic assistance and supply of decent and safe housing, has encouraged non-authorized urbanizations in high risk locations, which are built without complying any of the technical requirements, with materials such as non-confined masonry, prefabricated systems that are not endorsed by the Earthquake-Resistant Standard, wood and even corrugated metal roofing. In most cases, this type of buildings is seismically vulnerable.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:

Jefe del Laboratorio de Pruebas y Ensayos, Profesor Asociado e Investigador del Grupo de Estudios del Departamento de Ingeniería Civil
E-mail: daniel.ruiz@javeriana.edu.co



Por otro lado, ante la escasez de suelo cultivable y zonas verdes que permitan una mejor calidad de vida y sostenibilidad ambiental dentro de las ciudades, se han desarrollado alternativas tales como las cubiertas verdes en edificaciones alrededor de todo el mundo, que ha llevado a los "Techos verdes" a ser un tema recurrente en la actualidad, a tal punto que el Concejo de Bogotá ha tratado de implementar, promover y estimular el uso de tecnologías como esta mediante acuerdos (No. 338 DE 2009, No. 418 DE 2009 y mediante la resolución 6423 de 2011); así como lo establecido en la referencia (Secretaría Distrital del Medio ambiente, 2011). Una de las ventajas de las cubiertas verdes es que son auto-sostenibles y al ser bien implementadas pueden aportar ingresos económicos adicionales a los propietarios de las viviendas de bajos estratos.

Por las razones mencionadas anteriormente el grupo de investigación *Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente* y *PROSOFI* (Programa Social de la Facultad de Ingeniería) de la Pontificia Universidad Javeriana han propuesto para viviendas de población socialmente vulnerable (bajos estratos socioeconómicos) de Bogotá (y municipios cercanos a la Capital colombiana) una tipología de construcción de techos verdes que se basa en cubrir parte de la cubierta de las viviendas con vegetación potencialmente productiva (lechugas, rábanos y cebollas) (Forero y Devia, 2012). Esta vegetación se implanta dentro de recipientes reciclables (botellas de gaseosa) llenos de sustrato. Este sistema puede ser clasificado en la categoría de *techos verdes livianos*.

En todos los casos de estudio los pesos adicionales de las cubiertas verdes no superan la resistencia de la vivienda para cargas gravitacionales aunque debe mencionarse que dichas cargas cambian dependiendo de variables como la dimensión de la cubierta, el tipo de vegetación que será implementada, la profundidad del sustrato y la capacidad de retención de agua de la vegetación y de la tierra orgánica.

Como se mencionó en párrafos anteriores, la mayoría de los sistemas estructurales de las viviendas de bajos estratos no son construidas siguiendo los lineamientos de la Normas Colombianas de Construcción Sismo Resistente (AIS, 2010); y es evidente que las cubiertas verdes aportan una masa inercial que podría incrementar la vulnerabilidad sísmica de estas viviendas.

Por esta razón el grupo de investigación *ESTRUCTURAS* y *CONSTRUCCIÓN* del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana emprendió un análisis estructural, con enfoque sísmico, de la vivienda que se ha usado como prueba piloto de este tipo de cubiertas verdes. Para ello se realizó un estudio dinámico a la estructura de la vivienda (prefabricada) de un piso ubicada en la localidad de Soacha, la cual está habitada por una familia de bajos recursos económicos y que ven en la implementación de cubiertas verdes productivas una buena opción para la economía familiar.

La metodología implementada se presenta a continuación:

1. Visitas técnicas de inspección para evaluar: sistema constructivo, dimensiones de la edificación, características de los materiales, verificación en campo de los pesos de las cubiertas verdes
2. Instrumentación de la vivienda con acelerómetros sísmicos para medición de vibraciones ambientales con y sin techos verdes (determinación de los periodos fundamentales de vibración).

On the other hand, given the lack of growing land and green areas that allow a better quality of life and environmental sustainability within the cities, alternatives such as "green roofs" have been developed in buildings around the world, which have currently become a recurrent subject, up to the point that the Council of Bogota has tried to implement, promote and encourage the use of these technologies through agreements N° 338 DE 2009, N° 418 DE 2009 and through the resolution 6423 of 2011; as well as what has been stipulated in the reference (Secretaría Distrital del Medio Ambiente, 2011). One of the advantages of green roofs is that they are self-sustainable and when properly implemented they can contribute with additional economic incomes to the owners of vulnerable housing.

Therefore, the research group Science and Engineering of Water and the Environment and Social Program of the Faculty of Engineering (PROSOFI) of the Pontificia Universidad Javeriana proposed for Bogota's socially vulnerable population (low socioeconomic classes), and nearby townships, a construction typology of green roofs based on covering the rooftop of houses with potentially productive vegetation (lettuce, radish and onions) (Forero & Devia, 2012). This vegetation is introduced in recyclable containers (soda bottles) full of substrate. This system can be classified in the category of lightweight green roofs.

In all case studies, the additional weight of green roofs do not exceed the resistance of the house due to gravity loads, although we should mention that these loads change depending on variables such as the roof's dimension, type of introduced vegetation, substrate depth, and the water holding capacity of the vegetation and organic soil.

As we already mentioned, most of the structural systems of vulnerable housing are not built according to the guidelines of the Colombian earthquake-resistant construction standards AIS, 2010 (Normas Colombianas de Construcción Sismo Resistente); and it is evident that green rooftops provide an inertial mass that could increase the seismic vulnerability of these houses.

Therefore, the research group STRUCTURES and CONSTRUCTION of the Department of Civil Engineering of the Pontificia Universidad Javeriana performed a seismic structural analysis on the house used as a pilot test for this type of green rooftops. A structural dynamic analysis was performed in the (prefabricated) one-story house located in Soacha, inhabited by a low-income family who considers the implementation of productive green rooftops as a good option for the family economy.

The following methodology was applied:

1. *Technical inspection visits to assess: constructive system, building dimensions, materials characteristics, on-site inspection of the green roofs' weights.*
2. *House monitoring with seismic accelerometers to measure environmental vibrations with and without green roofs (determination of the fundamental period of vibration).*



3. Modelación numérica de la edificación por el método de los elementos finitos y comparación de períodos estimados con el modelo vs. períodos medidos en campo.
4. Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de la edificación con y sin techos verdes mediante: 1. índices de flexibilidad y 2. esfuerzos máximos inducidos por los movimientos sísmicos del terreno.
3. *Finite element modeling of the building and comparison of periods estimated with the model vs. periods measured on site.*
4. *Seismic vulnerability assessment of the building with and without green roofs through: 1. Flexibility indexes and 2. Maximum stresses induced by seismic ground motions.*

2. Techos verdes implementados

Se construyó un techo verde productivo (ver Figura 1), según el método propuesto por Forero et al. (2012). Este techo tiene dos especies de plantas: una herbácea (*Lactuca sativa*) y una crucífera (*Raphanus sativus*). Dichas especies fueron seleccionadas debido a sus bajas profundidades reticulares (Casseres, 1980), sus altas tasas de crecimiento (alrededor de dos meses) y por tratarse de plantas aptas para el consumo humano, lo cual podría resultar interesante para la comunidad objetivo. El techo verde implementado consiste en más de 100 botellas plásticas recicladas (cada botella con una capacidad de origen de 2.5 litros) utilizadas como recipientes para tres plántulas (dos *Lactuca sativa* y una *Raphanus sativus*). Las botellas están unidas entre sí por tubos que conducen agua lluvia, y que forman además un eficiente sistema de riego. La profundidad promedio del suelo es de 8 cm con 60% de tierra negra y 40% de cascarilla de arroz. El sistema de riego tiene como propósito garantizar el mínimo contenido de agua necesario para el crecimiento y la supervivencia de las plantas (ver Figura 1). Es importante mencionar que los elementos de la cubierta vegetal no están anclados. Se mantienen en su posición por las conexiones del sistema de riego.

2. Implemented green roofs

A productive green roof was built (see Figure 1) according to the method proposed by Forero et al. (2012). This roof has two plant species: herbaceous (*Lactuca sativa*) and cruciferous (*Raphanus sativus*). These species were chosen due to their shallow depth roots (Casseres, 1980), high growth rates (around two months) and suitability for human consumption, which could be interesting for the target community. The implemented green roof consists in more than 100 recycled plastic bottles (each bottle with an original capacity of 2.5 liters) used as containers for three seedlings (two *Lactuca sativa* and one *Raphanus sativus*). The bottles are connected through rainwater channeling pipes which also form an efficient irrigation system. The average soil depth is 8 cm, with 60% black soil and 40% rice husk. The purpose of the irrigation system is to guarantee the minimum water content needed for the plants' growing and survival (see Figure 1). It is important to highlight that the elements of the vegetable rooftop are not anchored; the connections of the irrigation system keep them in place.



Figura 1. Imágenes de techo verde propuesto
Figure 1. Image of the proposed green roof

Este tipo de techo verde ha sido objeto de estudio desde 2011 obteniendo que éste podría impactar a la comunidad no solamente en lo que concierne la producción agrícola, favoreciendo la autogestión y la apropiación del territorio (Forero et al., 2012), sino también en cuanto a reducciones de costos de construcción de infraestructura de drenaje urbano, así como en la mitigación de riesgos de inundación en territorios vulnerables (Oviedo y Torres, 2013). Familias del sector de Cazucá (víctimas del desplazamiento forzado por la violencia) han sembrado en sus techos lechugas, rábanos, cebolla larga, espinacas y perejil. La altura de estas plantas no supera los 10 cm ya que se encuentran en condiciones controladas de nutrientes y agua; lo cual limita su crecimiento. Cada techo cumple con otra función: capturar agua, que en otro escenario caería al suelo y contribuiría a la erosión de laderas.

Sin embargo, aún no se cuenta con resultados definitivos sobre temas energéticos, ambientales (aire, agua) y estructurales, los cuales podrían limitar o favorecer la utilización de este tipo de sistemas en territorios marginados, siendo el presente trabajo un primer paso en la evaluación estructural del sistema. En los últimos años

3. Características de la vivienda bajo estudio

Una de las varias fundaciones benéficas que existen en Colombia fue la promotora y principal responsable de la construcción de la vivienda prefabricada a estudiar. La tipología implementada para esta vivienda es muy similar a las que otras fundaciones (un techo para mi país, fundación Catalina Muñoz, TECHO, entre otras) han construido a lo largo y ancho de Colombia para estratos socio-económicos vulnerables (Figura 2a). El sistema constructivo de la vivienda prefabricada, consiste en paneles modulares de concreto encajados en perfiles de lámina delgada de acero galvanizado (Ver Figura 1a). Estos componentes facilitan el ensamblaje de todas las partes de la vivienda. Sus principales componentes son:

- Paneles modulares de concreto, reforzados con alma de aluminio.
- Perfiles de láminas de acero galvanizado doblado calibre 22, que facilitan el ensamble de los paneles.
- Soporte de cubierta en madera
- Tejas de fibrocemento.

La vivienda bajo estudio es de un nivel con 25.39 m² de área construida en donde hay espacio disponible para dos habitaciones, cocina, sala y comedor. La distribución arquitectónica se muestra en la Figura 2b.

This type of green roof has been studied since 2011, concluding that it could impact the community not only regarding agricultural production, favoring self-management and appropriation of the land (Forero et al., 2012), but also in relation to cost reductions in the construction of urban drain infrastructure, and the mitigation of flood risks in vulnerable territories (Oviedo & Torres, 2013). Families of the Cazucá sector (victims of relocation forced by violence) have sown lettuce, radish, scallion, spinach and parsley on their roofs. These plants are not higher than 10 cm, since they are in controlled conditions of nutrients and water, which limits their growth. Each roof fulfills another function: they capture water, which in a different scenario would fall to the ground and contribute to the hillside erosion.

Nevertheless, there are no definitive results available on energy, environmental (air, water) and structural matters, which could restrain or favor the use of this type of systems in segregated territories; this paper is a first step regarding the structural evaluation of the system.

3. Characteristics of the studied house

One of several charitable foundations in Colombia was the promoter and main responsible for the construction of the studied prefabricated home. The typology implemented for this house is very similar to that which other foundations (Un Techo para mi País, Fundación Catalina Muñoz, TECHO, among others) have built throughout Colombia for socioeconomically vulnerable classes (Figure 2a). The constructive system of the prefabricated house consists in modular concrete panels fitted in profiles of thin galvanized steel sheets (see Figure 1a). These components enable the assembly of all parts of the house. The main components are:

- *Modular concrete panels, aluminum-reinforced.*
- *Profiles of galvanized steel sheet folded 22 gauge, which enable the assembly of the panels.*
- *Wooden roof support.*
- *Fiber-cement roof tiles.*

The studied house is a one-story home with 25.39m² of built area, with available space for two rooms, kitchen, living and dining room. The architectural distribution is shown in Figure 2b.



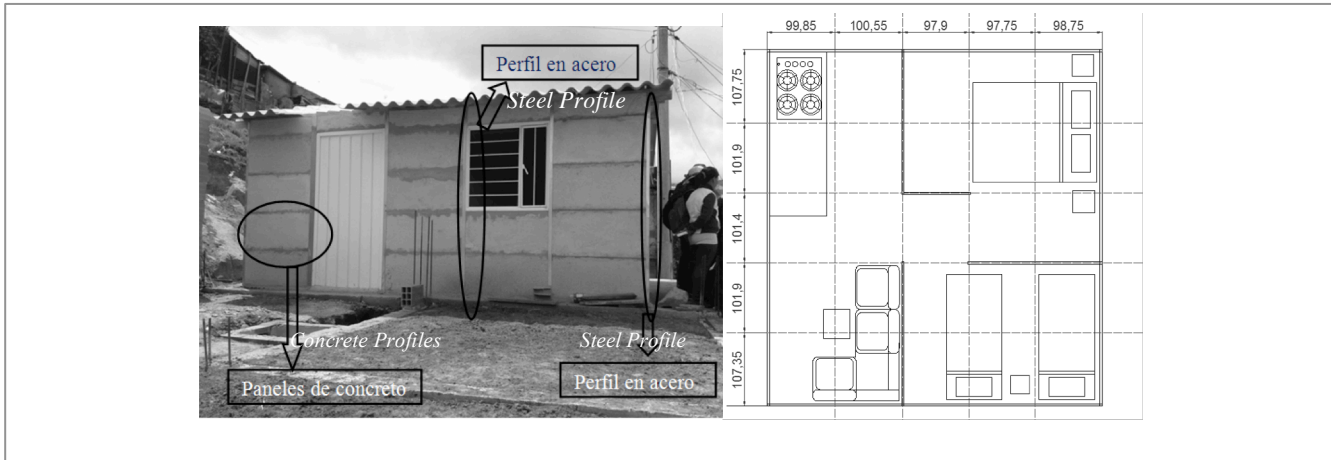


Figura 2. a) Imagen de la vivienda bajo estudio b) Plano Arquitectónico vivienda. Unidades: Centímetros (cm)
Figure 2. a) Image of the studied house b) Architectural drawing of the house. Units: centimeters (cm)

En la Figura 3 se presentan las características geométricas de los perfiles de acero galvanizado de la vivienda y su disposición en la misma.

Figure 3 shows the geometrical characteristics of the galvanized steel profiles of the house and their layout.

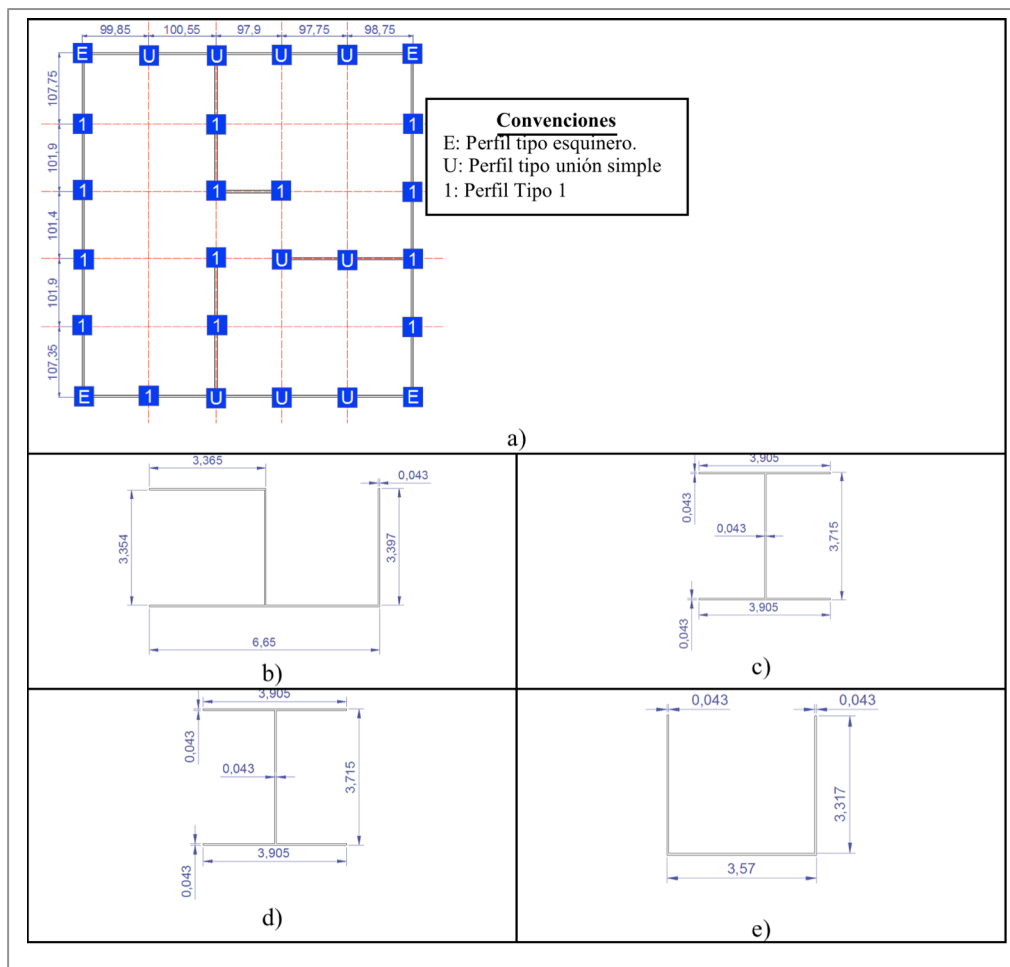


Figura 3. a) Ubicación de los perfiles de acero galvanizado. b) Perfil esquinero (E). c) Perfil Unión Simple (U). d) Perfil Tipo 1 (1) e) Perfil Viga Techo (U). Centímetros (cm)
Figure 3. a) Position of galvanized steel profiles, b) corner profile (E), c) simple connection profile (U), d) type 1 profile (1), e) Roof beam profile (U). Centimeters (cm)



Por otro lado la cimentación está constituida por una placa de concreto pobre que brinda nivelación y estabilidad a la estructura. La cubierta es a dos aguas con pendiente aproximada de 18° (33%); en donde las tejas de fibrocemento se apoyan sobre vigas de madera como se indica en la Figura 4.

Furthermore, the foundation is made up of a poor concrete plate which provides leveling and stability to the structure. It has a gabled rooftop with a slope of approximately 18° (33%), where fiber-cement tiles are supported on wooden beams, as indicated in Figure 4.



Figura 4. Vigas de madera que soportan la cubierta a dos aguas
Figure 4. Wooden beams which support the gabled roof

A pesar de que los principales materiales con los que se construye la vivienda siguen un proceso estandarizado de fabricación, el sistema constructivo deja muchos campos abiertos para la incertidumbre con respecto a su comportamiento estructural ya que adolece de un diafragma rígido y de una unidad estructural puesto que los paneles de concreto (de 3.2 cm de espesor) se ensamblan sin ningún tipo de conexión entre ellos.

Todos los elementos que componen el techo verde fueron pesados de manera independiente para poder tener un adecuado estimativo de la masa adicional que se impondría a la vivienda. Los pesos fueron tomados in campo mediante balanzas electrónicas calibradas para este fin y su peso total se estimó en 3693.9 N (botellas pet llenas de sustrato, peso de las hortalizas, sistema de riego, agua en el sistema)

4. Instrumentación de la vivienda

Para llevar a cabo las mediciones, se diseñó e implementó un completo sistema electrónico de alta sensibilidad conformado por los siguientes elementos:

- Cuatro acelerómetros sísmicos uniaxiales marca Wilcoxon. Los acelerómetros tienen la capacidad de medir aceleraciones en un rango desde 0.000001 hasta 0.5g. La respuesta de estos sensores se mantiene lineal para un rango de frecuencias entre 0.05 y 200 Hz.
- Amplificadores y filtros para los acelerómetros que permite establecer amplificaciones de 10, 100 o 1000 mV/g y filtros de 450 Hz y de los 100 Hz.
- Sistema de adquisición de datos para los cuatro canales (marca "National Instruments") que permite tomar datos a una velocidad de 2000 datos por segundo.

Although the main materials used in the construction of the home follow a standardized manufacturing process, the constructive system leaves many open spaces for uncertainty in relation to its structural behavior, since it has a rigid diaphragm and one structural unit, because concrete panels (3.2 cm thick) are assembled without any type of connection between them.

All elements forming the green roof were weighed independently so as to be able to rely on a proper estimate of the additional mass to be imposed on the house. Weights were taken on site with electronic scales calibrated for this purpose and its total weight was estimated in 3693.9 N (pet bottles full of substrate, weight of vegetables, irrigation system, and water in the system).

4. House implementation

In order to perform the measurements, a complete high-sensitivity electronic system was designed, including the following components:

- Four Wilcoxon uniaxial seismic accelerometers, which are capable of measuring accelerations in a range from 0.000001 to 0.5g. The frequency response of these sensors is linear in a range between 0.05 and 200 Hz.
- Amplifiers and filters for the accelerometers, allowing amplifications of 10, 100 or 1000 mV/g and filters of 450 Hz and 100 Hz.
- Data purchase system for the four channels (brand "National Instruments"), which allows data collection at a speed of 2000 data per second.



- Computador portátil con el software licenciado Labview (“National Instruments”) para control y toma de datos.
- Soportes para instalación de los acelerómetros en la cubierta

- Laptop with the registered software Labview (“National Instruments”), for data collection and control.
- Supports for installing the accelerometers on the roof.

En la Figura 5 se muestra el sistema de adquisición de datos y uno de los acelerómetros sísmicos usados.

Figure 5 shows the data purchase system and one of the seismic accelerators.

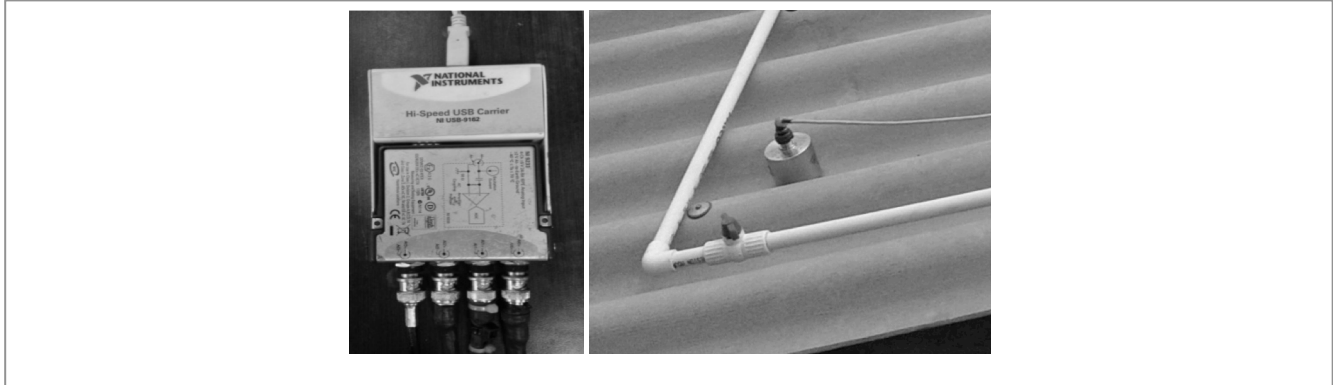


Figura 5. a) Sistema de adquisición de datos b) acelerómetro sísmico marca Wilcoxon
Figure 5. a) Data purchase system b) Wilcoxon seismic accelerometer

El objetivo principal de la medición fue determinar el período fundamental de la vivienda (con techo y sin techo verde) a través del análisis de vibraciones ambientales. Se instrumentó la vivienda tanto en dirección este-oeste como en dirección norte-sur pero fue evidente que la estructura respondería en dirección de su modo fundamental que estaba alineado en dirección este-oeste. Esto se debe principalmente a que en la dirección Norte-Sur la edificación tiene mayor densidad de muros y con una menor cantidad de vacíos (puertas y ventanas) que la hacen mucho más rígida. Es probable por lo tanto que ante un evento sísmico la estructura tendría principalmente desplazamientos en dirección este-oeste.

The main objective of the measurement was to determine the fundamental period of the house (with and without green roof) through the assessment of environmental vibrations. The house was implemented both in the east-west and north-south directions, but it was evident that the structure would respond in the direction of its fundamental mode that was aligned in the east-west direction. This is mainly due to the fact that in the north-south direction the building has greater wall density and smaller number of voids (doors and windows), which make it more rigid. Therefore, it is probable that in the event of an earthquake the structure will show east-west displacements mainly.

Los cuatro acelerómetros sísmicos fueron ubicados como se indica en la Figura 6.

The four seismic accelerometers were located as indicated in Figure 6.

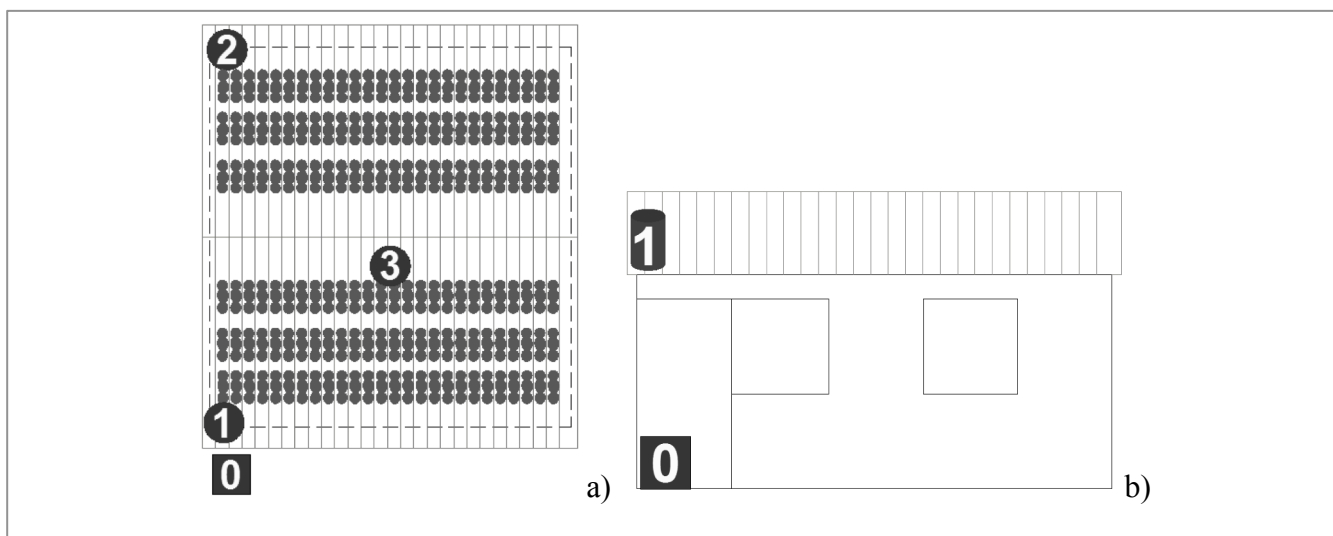


Figura 6. Ubicación de acelerómetros a) Vista en planta b) Vista en alzado
Figure 6. Location of accelerometers: a) Top view b) Front view



El acelerómetro del canal "0" se ubicó a nivel de cimentación, los acelerómetros de los canales "1" y "2" se ubicaron en dos lados opuestos de la cubierta de la vivienda y el acelerómetro del canal "3" se instaló en el centro geométrico de la vivienda. En la Figura 7 se muestran imágenes del proceso de medición con y sin techo verde. En la campaña de medición se tomaron más de 50 registros de 2 minutos a diferentes horas del día con una tasa de muestreo de 400 datos por segundo para cada uno de los 4 canales.

The accelerometer of channel "0" was located at the foundation level, accelerometers of channels "1" and "2" were located at two opposing sides of the rooftop and the accelerometer of channel "3" was installed at the geometrical center of the house. Figure 7 shows images of the measurement process with and without green roof. During the measurement season, more than 50 records of 2 minutes were taken at different times of the day, with a sampling rate of 400 data per second for each one of the 4 channels.

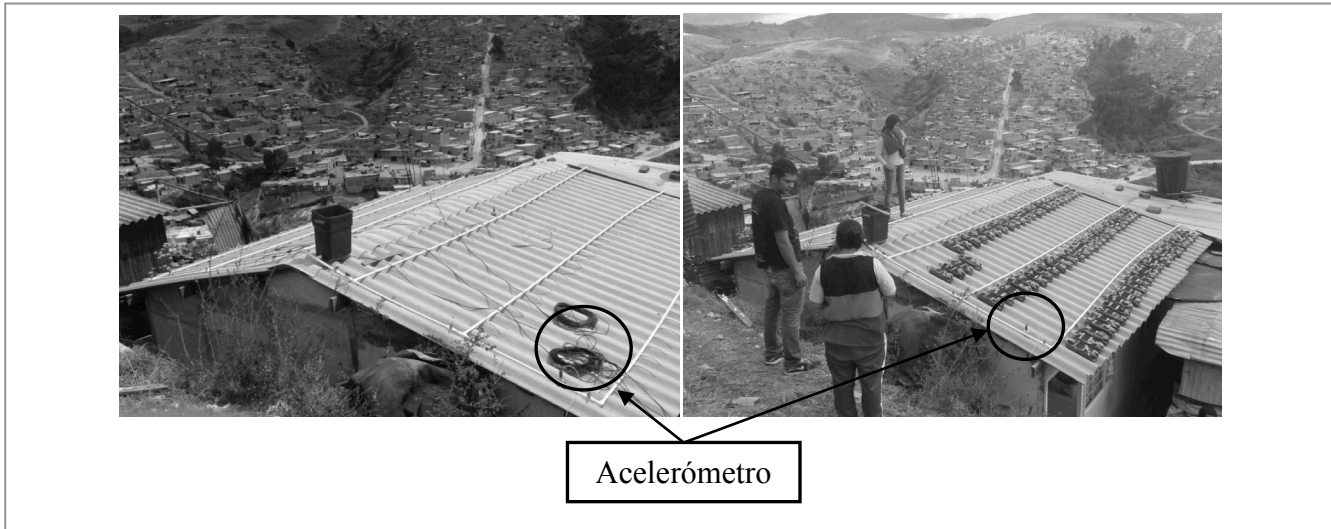


Figura 7. Fotografías de la instrumentación a) sin techo verde b) con algunas plantas del techo verde
Figure 7. Photos of the implementation: a) without green roof b) with some plants of the green roof

Mediante procesos similares a los implementados en (Emiliani, Rincón y Ruiz, 2012), (Zabala, Gutiérrez y Ruiz, 2012), (Cifuentes y Ruiz, 2007), (Ruiz, Otálora y Rodríguez, 2007) se estimaron los períodos a través de vibraciones ambientales. Una vez registradas las vibraciones ambientales, el método consiste en estimar las funciones de transferencia entre los sensores ubicados en la cubierta y el sensor base ubicado a nivel de cimentación (Chopra, 2001). Esto permite ver las amplificaciones para frecuencias cercanas a las de los modos de vibración del sistema dinámico evaluado, en este caso la vivienda con y sin techos verdes. En la Figura 8 se muestran ejemplos de registros de vibraciones ambientales en dirección Este-Oeste para el acelerómetro del canal "2" y para el acelerómetro del canal "0".

By means of processes similar to those implemented in (Emiliani, Rincón & Ruiz, 2012), (Zabala, Gutiérrez & Ruiz, 2012), (Cifuentes & Ruiz, 2007), (Ruiz, Otálora & Rodríguez, 2007), periods were estimated through environmental vibrations. Once the environmental vibrations were recorded, the method estimated the transfer functions between the sensors located in the rooftop and the base sensor located at the foundation level (Chopra, 2001). This allows seeing the amplifications for frequencies close to those of the vibration modes of the assessed dynamic system, in this case, the house with and without green roofs. Figure 8 shows examples of environmental vibration records in the east-west direction for the accelerometers of channel "2" and channel "0".

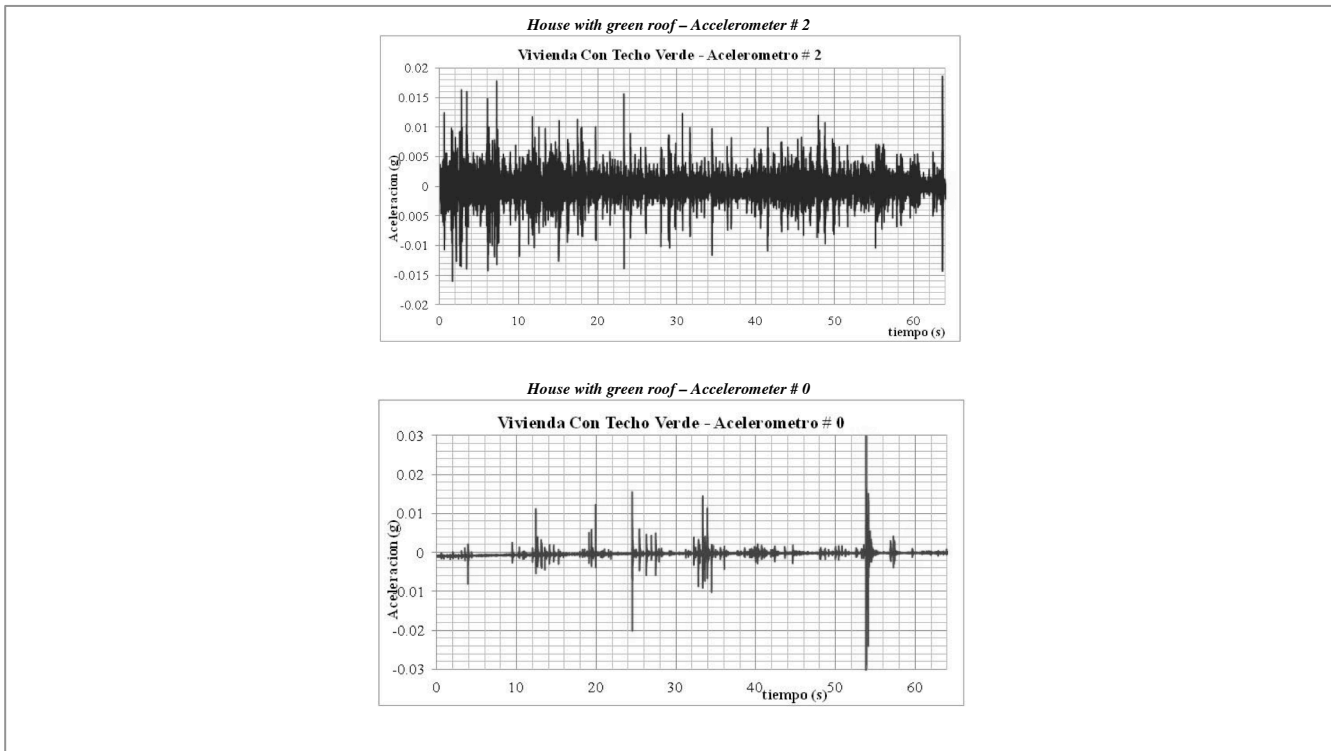


Figura 8. Ejemplo de señales registradas con los acelerómetros
Figure 8. Example of signals recorded with the accelerometers

Una vez hechas las mediciones, los registros fueron procesados mediante técnicas numéricas para determinar las funciones de transferencia. En la Figura 9 se muestra, para la dirección principal de movimiento (dirección Este-Oeste), las funciones de transferencia para la vivienda sin techo verde. Lo propio se hace en la Figura 10 para las funciones de transferencia de las mediciones hechas en la vivienda con techo verde.

After the measurements, the records were processed by numerical techniques in order to create transfer functions. Figure 9 shows the transfer function for the house without green roof, for the main motion direction (east-west). The same is done in Figure 10 for the transfer functions of the measurements taken in the house with green roof.

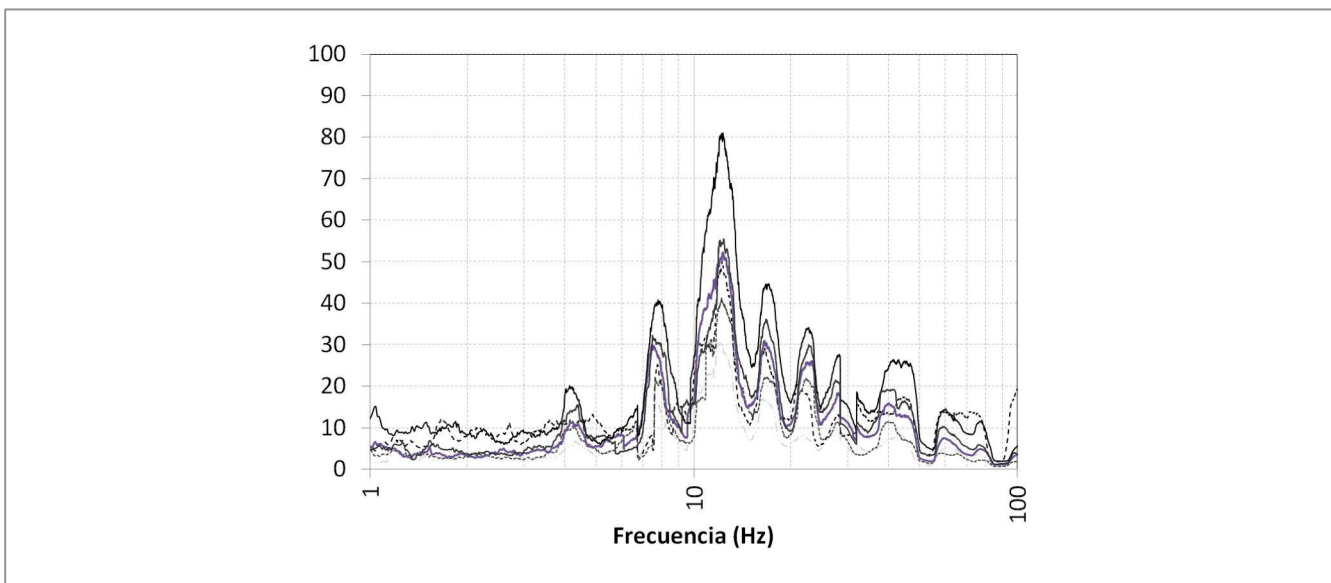


Figura 9 Función de transferencia de vivienda SIN techo verde
Figure 9. Transfer function of the house WITHOUT green roof

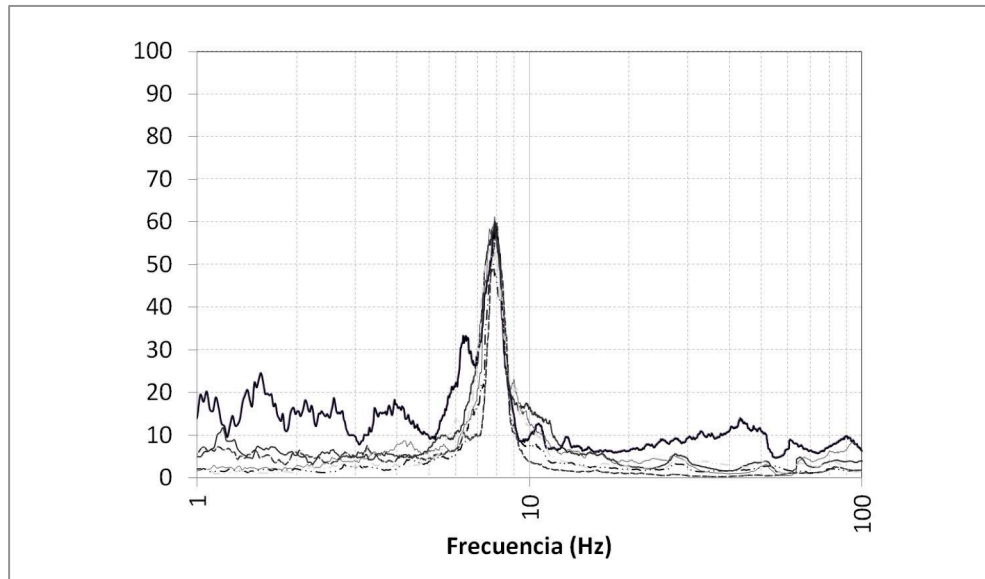


Figura 10. Función de transferencia de vivienda CON techo verde
Figure 10. Transfer function of the house WITH green roof

Al analizar los anteriores resultados es evidente que la presencia del techo verde cambia las propiedades dinámicas de la vivienda incrementando su periodo fundamental de vibración; ya que las funciones de transferencia pasan de amplificaciones para una frecuencia de 12.25 Hz (período de 0.0816 s) SIN techo verde a amplificaciones para una frecuencia de 7.86 Hz (período de 0.127 s) para la vivienda con techos verdes.

5. Modelación numérica de la vivienda mediante elementos finitos

Con ayuda del programa SAP2000 (CSI, 2012) se desarrollaron los modelos numéricos de la vivienda CON y SIN techo verde. En ambos modelos se mantuvieron idénticas las características geométricas y mecánicas de los materiales, sin embargo solo a uno de los dos modelos se le aplicó la carga y la masa correspondiente al Techo Verde inducido por las botellas PET y otros accesorios como el sistema de riego.

Durante la modelación de la vivienda fue necesaria la creación de tres (3) tipos de materiales, el concreto, el acero y la madera. El peso unitario del concreto se determinó con base en lo recomendado en la Normativa Sismo Resistente de Colombia (NSR-10) que se presenta en la referencia (AIS, 2010). Dicho peso unitario es 22 kN/m³. Por otro lado, de acuerdo con lo reportado por (Ruiz et al., 2013) la referencia (AIS, 2010) sobrestima en un 40% el real Modulo de Elasticidad del concreto para Bogotá. Por ello y con base en las fórmulas recomendadas en (Ruiz et al., 2013) y que se presentan en la Figura 11, se asignó en el modelo un módulo de elasticidad de 17872 MPa a los paneles de concreto, que corresponde a un concreto con 21 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días.

Es importante mencionar que de haber usado el módulo de elasticidad recomendado en (AIS, 2010), no habría existido un ajuste adecuado entre los períodos experimentales (vibraciones ambientales) y los períodos estimados con el modelo numérico.

When analyzing the above results, it is evident that the presence of green roof changes the dynamic properties of the house, increasing its fundamental period of vibration, since the transfer functions go from amplifications for a frequency of 12.25 Hz (period of 0.0816 s) WITHOUT green roof to amplifications for a frequency of 7.86 Hz (period of 0.127 s) for the house WITH green roof.

5. Finite element numerical modeling of the house

The numerical models of the house WITH and WITHOUT green roof were developed with the help of the SAP2000 software (CSI, 2012). In both models, the geometrical and mechanical characteristics of the materials were kept identical; however, the load and mass corresponding to the green roof, induced by PET bottles and other accessories such as the irrigation system, were applied to only one of the two models.

During the house modeling, it was necessary to create three (3) types of materials: concrete, steel and wood. The unit weight of concrete was calculated following the recommendations of the Colombian Earthquake-Resistant Standard (NSR-10), mentioned in the reference (AIS, 2010). This unit weight is 22 kN/m³. On the other hand, according to the reports of (Ruiz et al, 2013), the reference (AIS, 2010) overestimates by 40% the real modulus of elasticity of concrete for Bogota. Therefore, and based on the formulas recommended in (Ruiz et al, 2013), shown in Figure 11, a modulus of elasticity of 17872 MPa was assigned to the concrete panels, corresponding to a concrete with compressive strength of 21 MPa at 28 days.

It is important to mention that if we had used the modulus of elasticity recommended in (AIS, 2010), there would have been no proper adjustment between the experimental periods (environmental vibrations) and the periods estimated with the numerical model.

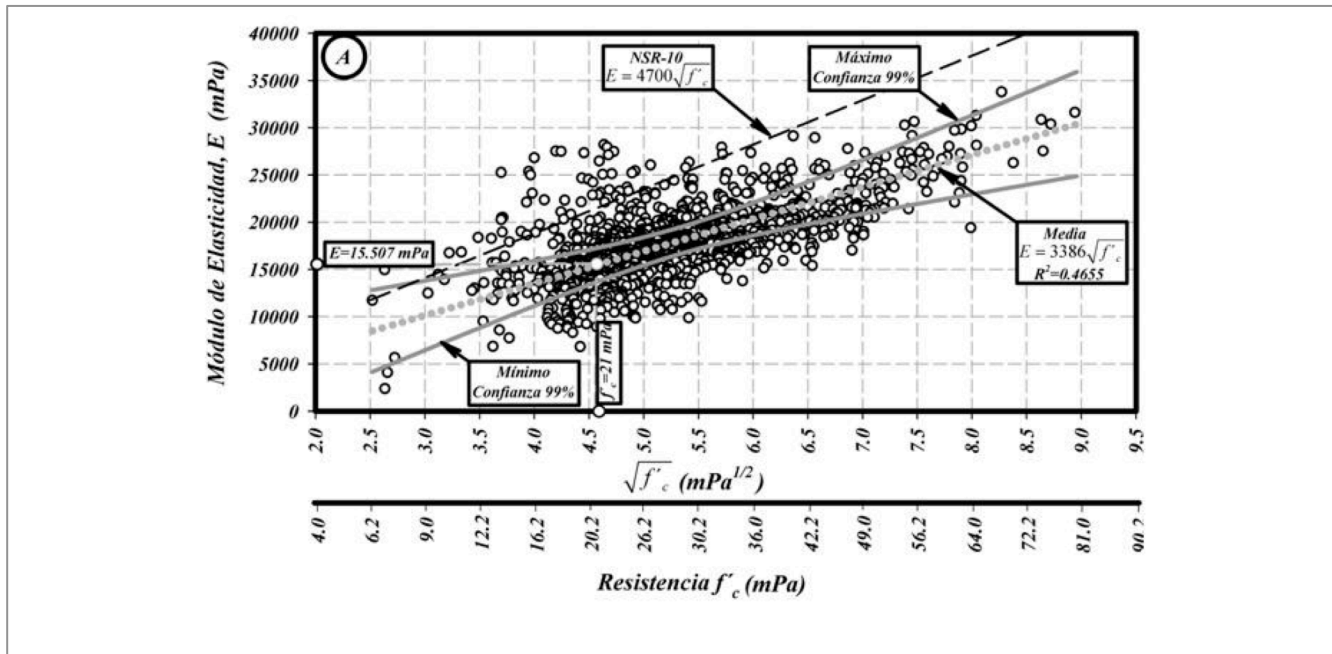


Figura 11. Estimación del módulo de elasticidad para los concretos usados en Bogotá (Tomado de (Ruiz et. al., 2013))
Figure 11. Estimate of the modulus of elasticity of concrete used in Bogota (based on (Ruiz et al, 2013))

Para el material acero de los perfiles de acero galvanizado, se usaron las siguientes propiedades mecánicas (AIS, 2010): Peso Unitario 78 kN/m^3 y Modulo de Elasticidad de 200.000 MPa .

Referente a la madera los valores escogidos para el peso unitario y el Modulo de Elasticidad fueron 9 kN/m^3 y 49000 MPa respectivamente. Vale la pena advertir que la madera es un material heterogéneo, compuesto y anisotrópico, por lo que sus propiedades mecánicas varían de acuerdo a factores como la humedad, el sentido de las fibras y defectos e imperfecciones, por lo que predecir su comportamiento estructural es mucho más complejo y se aumenta el margen de error. No obstante este material no tiene influencia significativa en el sistema estructural, debido a que no hace parte importante del sistema de resistencia sísmica.

Los perfiles de acero y las vigas de madera se modelaron como elementos tipo "frame", y se crearon cinco tipos de secciones para los distintos tipos de perfiles de la vivienda. Para cada uno de los perfiles metálicos se determinó manualmente las propiedades geométricas requeridas por el modelo de elementos finitos como área, constante torsional, momentos de inercia, entre otros. Los paneles de concreto fueron modelados como "Shells" con un espesor promedio de 32 mm . El modelo numérico por elementos finitos calculó el peso y la masa de todos los elementos que componen el sistema estructural. Sin embargo las cargas y las masas del Techo Verde (compuesto por las botellas individuales, el tanque de almacenamiento de agua y el sistema de riego) así como las tejas de fibrocemento fueron aplicadas como cargas (y masas) sobre impuestas. El peso del techo verde de 3694 N se aplicó a las vigas de madera como cargas uniformemente distribuidas y fue considerada como masa distribuida para el análisis dinámico.

For the steel material of the galvanized steel profiles, the following mechanical properties were used (AIS, 2010): Unit Weight of 78 kN/m^3 and Modulus of Elasticity of $200,000 \text{ MPa}$.

In relation to wood, the values chosen for the unit weight and the modulus of elasticity were 9 kN/m^3 and $49,000 \text{ MPa}$ respectively. It should be noted that wood is a heterogeneous, composite and anisotropic material, and therefore its mechanical properties vary according to factors such as humidity, sense of the fibers and its defects and imperfections; thus, predicting its structural behavior is much more complex and the margin of error is greater. However, this material has no significant influence on the structural system, because it is not relevant in the seismic-resistant system.

Steel profiles and wood beams were modeled as frame-type elements, and five types of profiles were created for the house's different types of frames. The geometrical properties required by the finite element model, such as area, torsion constant, moment of inertia, among others, were manually determined for each metal profile. Concrete panels were modeled as "shells" with an average thickness of 32 mm . The finite element numerical model calculated the weight and mass of all the elements that form the structural system. However, the loads and masses of the green roof (formed by individual bottles, water storage tank and irrigation system) as well as the fiber-cement tiles, were applied as superimposed loads (and masses). The green roof weight of 3694 N was applied to the wooden beams as evenly distributed loads and was considered as distributed mass for the dynamic analysis.



Este peso corresponde a una carga uniformemente distribuida de 0.3 kN/m^2 , la cual es inferior a la carga resistente de las tejas de fibrocemento que es de 1.0 kN/m^2 según el fabricante; lo cual da cabida a que la carga viva de cubierta considerada por la NSR-10 se pueda soportar (0.35 a 0.5 kN/m^2). Para el caso de las tejas de fibrocemento y de sus accesorios se usó los pesos establecidos por el fabricante. El peso de las mismas es de 3524 N y se asignó también como carga y masa distribuida a las vigas de madera.

En cuanto a la carga sísmica, se llevó a cabo un análisis modal espectral considerando una combinación direccional sobre la vivienda de 100% del sismo en dirección Este-Oeste aplicado simultáneamente con el 30% del sismo en dirección Norte-Sur y viceversa. Para el análisis se usaron varios espectros de respuesta en aceleración de sismos utilizados en la Microzonificación Sísmica de Bogotá del año 2010 (FOPAE, 2010). Estos sismos están ajustados al estudio de amenaza sísmica de Colombia y de Bogotá. También se usó el espectro de diseño del municipio en donde está implantada la vivienda, el cual es muy cercano la ciudad capital de Colombia. Los espectros de respuesta de los sismos evaluados son de origen regional y cercano; típicamente ajustados a zonas de amenaza sísmica intermedia y baja de la República de Colombia. Todos los espectros de respuesta analizados y el de diseño de la Norma Sismo Resistente NSR-10 (AIS, 2010) se presentan en la Figura 12.

This weight corresponds to an evenly distributed load of 0.3 kN/m^2 , which is lower than the load resistance of fiber-cement tiles, which is 1.0 kN/m^2 according to the manufacturer; this allows to bear the weight of the rooftop live loads considered by the NSR-10 (0.35 to 0.5 kN/m^2). The weights established by the manufacturer were used for the fiber cement tiles and their accessories. The tiles' weight is 3524 N , which was also assigned as load and distributive mass to the wooden beams.

As for the seismic load, a modal response spectrum analysis was run considering a directional combination on the house of 100% seismic action in east-west direction, simultaneously with 30% seismic action in north-south direction and vice versa. The analysis included several acceleration response spectra used in the 2010 Seismic Microzonation of Bogota (FOPAE, 2010). These earthquakes correspond to the study of seismic threat in Colombia and Bogota. The design spectrum of the municipality in which the house is located was also used, which is very close to the capital city of Colombia. The response spectra of evaluated earthquakes are of regional and nearby origin; typically adjusted to medium and low seismic threat regions of the Republic of Colombia. All assessed response spectra and the design of the Earthquake-Resistant Standard NSR-10 (AIS-2010) are shown in Figure 12.

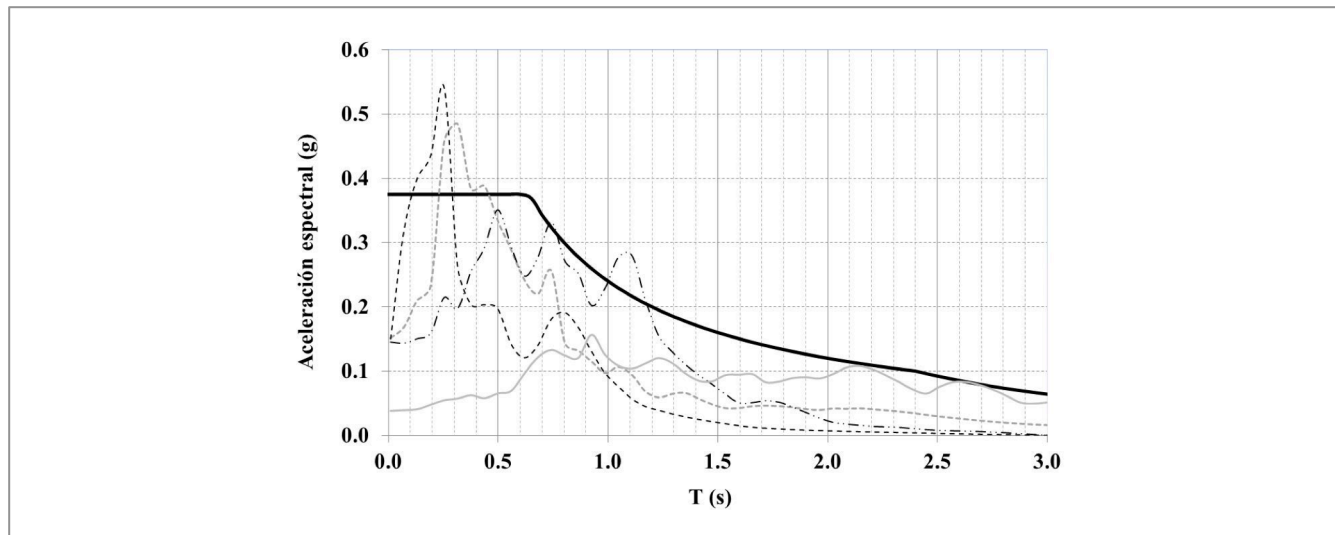


Figura 12. Espectro elástico de diseño para un coeficiente con respecto al crítico del 5%
Figure 12. Elastic design response spectrum for a coefficient of 5% in relation to the critical one

Para efectos del análisis de los esfuerzos inducidos en los elementos estructurales se utilizaron las siguientes combinaciones de carga: $1.2D + E$ y $1.4D$; en donde D corresponde los efectos derivados de la carga muerta y E los efectos de la carga sísmica. El Coeficiente de reducción de la fuerza sísmica (parámetro R según (AIS, 2010)) se estableció como 1.0 , debido a que construcciones prefabricadas y de periodos bajos tienden a no disipar demasiada energía. Esto se apoya en la (ATC, 1995) en donde se afirma que en edificaciones con períodos relativamente cortos, menores a 0.12 segundos, el coeficiente de disipación de energía tiende a ser uno.

Regarding the analysis of the stresses induced on the structural elements, the following load combinations were used: $1.2D + E$ and $1.4D$; where D corresponds to the effects derived from the dead load and E to the effects of the seismic load. The coefficient of seismic force reduction (parameter R according to (AIS, 2010)) was established as 1.0 , because precast constructions with low periods do not dissipate too much energy. This is based on (ATC, 1995), which states that in buildings with relatively short periods, lower than 0.12 seconds, the energy dissipation coefficient tends to be one.



Con base en la información de los anteriores párrafos, se elaboró el modelo en el programa de elementos finitos. En la Figura 13 se muestran imágenes de los modos fundamentales de vibración de la vivienda con y sin techo verde. El período de la vivienda sin techo verde es de 0.087 segundos mientras que el de la misma vivienda pero con la masa adicional sobre impuesta del techo verde tiene un período de 0.115 segundos.

The finite element model was based on the information of the above paragraphs. Figure 13 shows images of the fundamental modes of vibration of the house with and without green roof. The period of the house without green roof is 0.087 seconds, while that of the same house with the additional superimposed mass of the green roof has a period of 0.115 seconds.

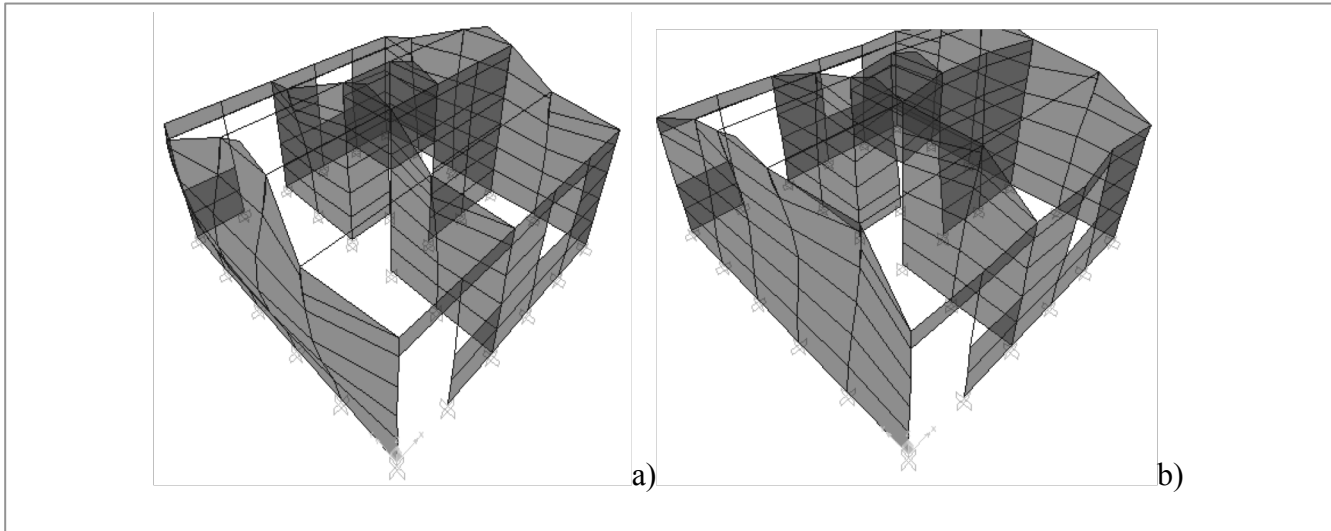


Figura 13. Modos de vibración a) Sin techo verde (0.087 s) b) Con techo verde (0.119s)
Figure 13. Modes of vibration: a) without green roof (0.087s) b) with green roof (0.119s)

Estos períodos son similares a los estimados con las funciones de transferencia de las mediciones de vibraciones ambientales que fue de 0.0816 s SIN techo verde y 0.127 s CON techo verde. De acuerdo con lo anterior el error del período del modelo numérico es de 6.21% para el modelo SIN techo verde y de 6.72% para el modelo CON techo verde. Estos porcentajes de error se consideran suficientemente bajos y permiten afirmar que el modelo numérico es confiable para estimar los índices de flexibilidad y los niveles de esfuerzo.

Se realizaron los análisis para las combinaciones de carga establecidas anteriormente y se obtuvo los desplazamientos máximos en los nudos de la cubierta de la vivienda. Posteriormente se calculó la distorsión de entrepiso (deriva sísmica según (AIS, 2010) como el desplazamiento del nudo de la cubierta dividida por la altura de cada nudo desde el nivel de la cimentación. Estos resultados se muestran para la edificación CON y SIN techo verde en la Figura 14.

These periods are similar to those estimated with the transfer functions of the environmental vibrations' measurements which were 0.0816s WITHOUT green roof and 0.127s WITH green roof. Thus, the error of the numerical model period is 6.21% for the model WITHOUT green roof and 6.72% for the model WITH green roof. These error percentages are considered sufficiently low and allow stating that the numerical model is reliable for estimating the flexibility indexes and stress levels.

Assessments for the previously established load combinations were made, and maximum displacements were obtained in the nodes of the rooftop of the house. Afterwards, the interstory distortion was calculated (seismic drift according to (AIS, 2010) as the displacement of the roof node divided by the height of each node from the foundation level. These results are shown in Figure 14 for the building WITH and WITHOUT green roof.

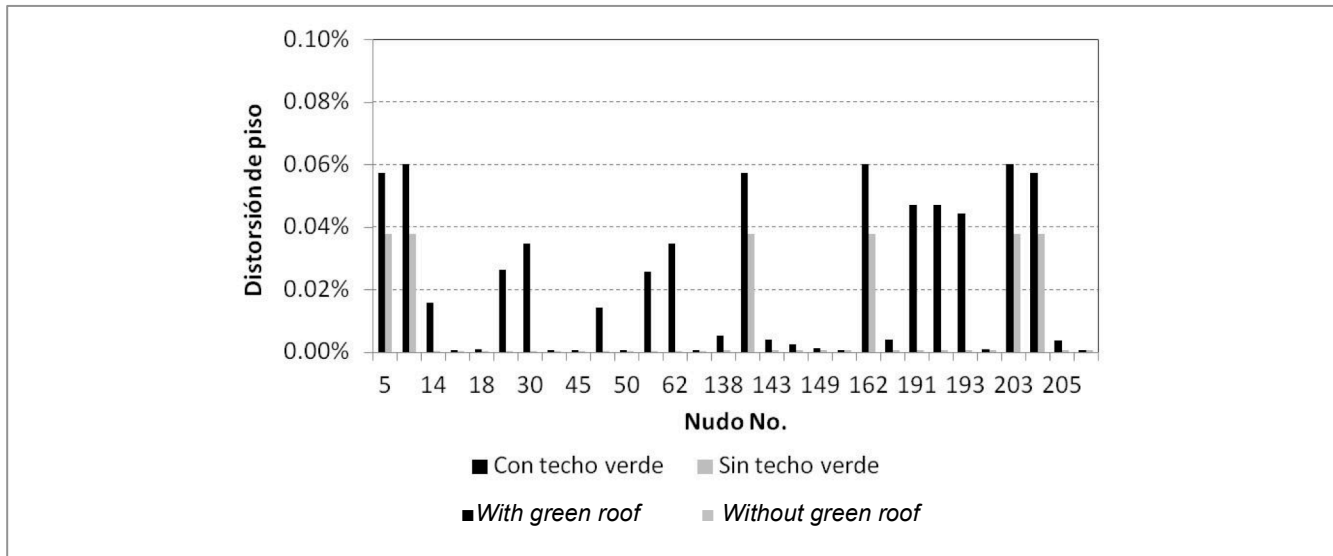


Figura 14. Comparación de la distorsión de piso para la vivienda con y sin techo verde
Figure 14. Comparison of the floor distortion for the house with and without green roof

De la Figura 14 se deduce que efectivamente hay un aumento significativo de los desplazamientos cuando está presente el techo verde (hasta del 62%). No obstante, los valores de deriva en ninguno de los dos casos de carga implican riesgo para la estabilidad y funcionalidad (daño en elementos no estructurales) de la vivienda prefabricada, teniendo en cuenta que no se supera el 1% de deriva (distorsión de entrepiso) establecida como valor límite en la NSR-10.

Por otro lado, en la Figura 15 se muestra una distribución de esfuerzos máximos para la combinación de carga sísmica crítica para el muro del eje 6 de la vivienda bajo estudio; tanto para la estructura CON techo verde como para la estructura SIN techo verde. Es evidente que los esfuerzos máximos, que podrían inducir agrietamientos en los paneles de concreto, crecen de una manera importante con la presencia del techo verde.

Figure 14 allows deducing that displacements increase significantly when the green roof is present (up to 62%). Nevertheless, in none of the two loading cases the drift values endanger the stability and functionality (damage in non-structural elements) of the prefabricated house, considering that the drift is not higher than 1% (interstory distortion), which is the limit value established by the NSR-10.

On the other hand, Figure 15 shows a distribution of maximum stresses for the combination of critical seismic loading for the wall of axis 6 of the studied house; for the structure both WITH and WITHOUT green roof. It is evident that the maximum stresses, which could induce cracking in the concrete panels, significantly increase with the presence of green roof.

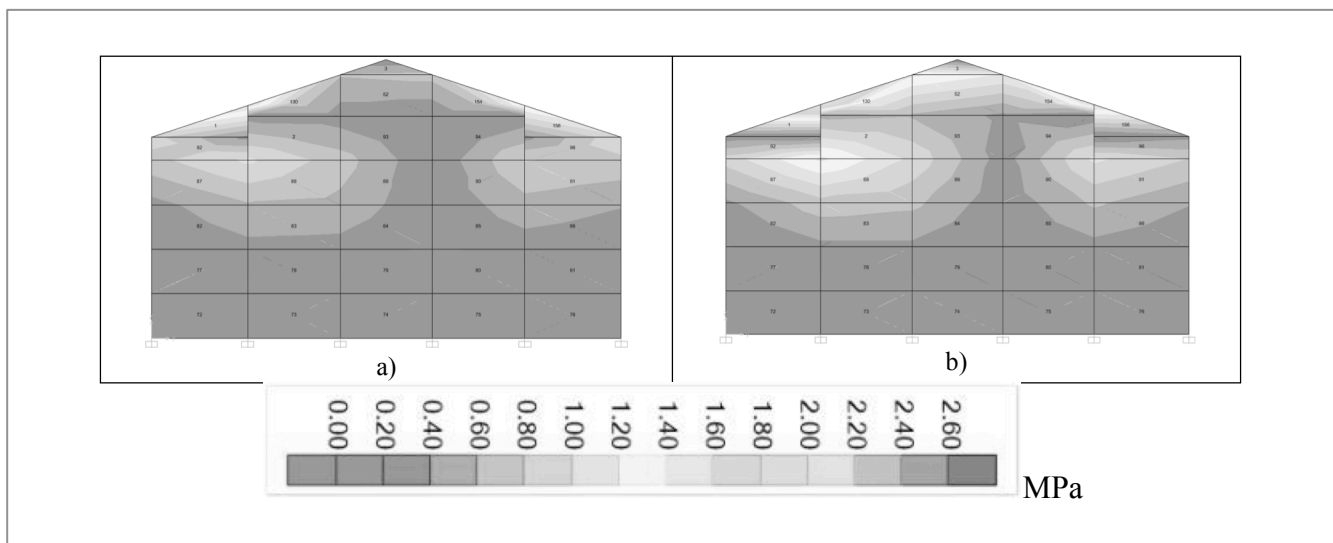


Figura 15. Esfuerzos máximos actuantes sobre muro del eje 6 a) Sin techo verde y b) Con techo verde
Figure 15. Maximum stresses acting over wall of axis 6: a) without green roof and b) with green roof



Para realizar un análisis global de estos niveles de esfuerzo en la vivienda, en la Figura 16 se muestra la comparación de los esfuerzos máximos inducidos por la combinación de carga sísmica para todos los elementos finitos de la edificación. Este análisis se hace para la vivienda CON y SIN techo verde.

In order to make a global analysis of these stress levels in the house, Figure 16 shows the comparison of maximum stresses induced by the seismic load combination for all finite elements of the building. This analysis is made for the house WITH and WITHOUT green roof.

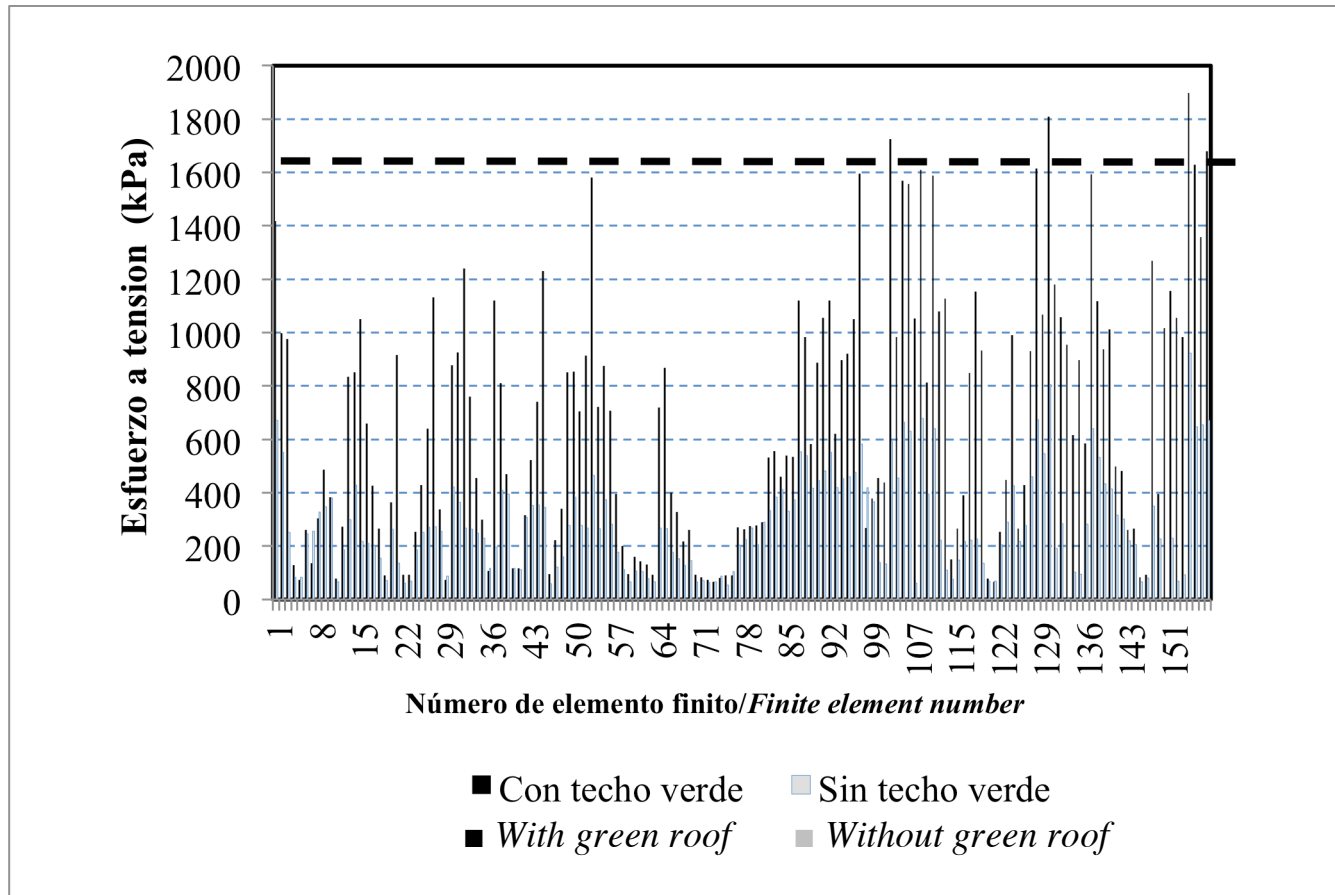


Figura 16. Esfuerzos máximos actuantes sobre la vivienda bajo análisis
Figure 16. Maximum stresses acting over the analyzed house

De acuerdo con la información de la Figura 16, al instalar el techo verde en la cubierta de la vivienda los esfuerzos máximos asociados con las combinaciones de carga sísmica se hasta en un 241% en la vivienda CON techo verde.

Based on the information of Figure 16, when installing the green roof on the rooftop of the house, the maximum stresses associated to the seismic load combinations increase by up to 241% in the house WITH green roof.

De acuerdo con los resultados de (Mogollón, 2012) el esfuerzo a tensión promedio resistente del concreto usado para la construcción de las viviendas prefabricadas de este tipo es de 1656 kPa y por ello en la Figura 16 se pone una línea punteada de referencia. Con base en lo anterior es evidente que la vulnerabilidad sísmica de la vivienda se aumenta con la presencia del techo verde, sin embargo los resultados no son críticos ni ponen en riesgo la estabilidad y funcionalidad de la casa prefabricada si se tiene en cuenta que tan solo 3 paneles superarían el esfuerzo de rotura. Adicionalmente es de esperarse que la vivienda tenga una mayor capacidad de disipación de energía que permitiría suponer un mayor coeficiente de reducción de la fuerza sísmica (R hasta de 1.5).

According to the results of (Mogollón, 2012), the average resistance to tensile stress of the concrete used for this type of prefabricated houses is 1656 kPa, and therefore a reference dotted line is drawn in Figure 16. Based on the foregoing, it is evident that the seismic vulnerability of the house increased with the presence of the green roof; however, results are not critical nor put the stability and functionality of the prefabricated house at risk if we take into account that only 3 panels exceed the rupture stress. Furthermore, we should expect that the house has greater energy dissipation capacity, which would allow assuming a higher seismic force reduction coefficient (R up to 1.5).



6. Conclusiones

- El período estructural para la vivienda prefabricada se incrementó con la instalación de la cubierta verde. El período estimado mediante técnicas experimentales fue de 0.0816 s SIN techo verde y de 0.127 s CON techo verde, lo cual implica un incremento del 56%.
- Las distorsiones de entrepiso (deriva sísmica) de la vivienda prefabricada aumentaron cuando se le instaló la carga de la cubierta verde a la estructura. A la luz de los resultados se incrementaron los desplazamientos debidos a movimientos sísmicos hasta en un 62%. Es importante resaltar que estos desplazamientos en ningún momento superaron el valor límite definido por la normativa Sismo Resistente Colombiana (NSR10).
- Los esfuerzos máximos a tensión en los paneles de concreto (que hacen parte del sistema estructural de la vivienda) se incrementaron hasta en un 241% como consecuencia de las mayores fuerzas sísmicas ocasionadas por la masa inercial adicional aportada por la cubierta verde. Tan solo 3 paneles de concreto de la vivienda superaron el esfuerzo máximo de 1656 kPa cuando se modeló la estructura con la cubierta verde.
- Con base en lo anterior es evidente que la vulnerabilidad sísmica de la vivienda prefabricada incrementó con la presencia del techo verde, sin embargo los resultados no son críticos ni ponen en riesgo la estabilidad y funcionalidad de la casa prefabricada.

6. Conclusions

- *The structural period for the prefabricated house increased with the installation of the green roof. The period estimated by experimental techniques was 0.0816s WITHOUT green roof and 0.127s WITH green roof, which means a 56% increase.*
- *The interstory distortions (seismic drift) of the prefabricated house increased when the green roof load was put on the structure. In the light of the results, displacements due to seismic motions increased by up to 62%. It is important to highlight that these displacements did not ever exceed the limit values defined by the Colombian seismic-resistant standard (NSR-10).*
- *The maximum tensile stresses in the concrete panels (which are part of the structural system of the house) increased by up to 241%, as a consequence of greater seismic forces caused by the additional inertial mass of the green roof. Only 3 concrete panels of the house exceeded the maximum stress of 1656 kPa when the structure was modeled with the green roof.*
- *Based on the above, it is evident that the seismic vulnerability of the house increased with the presence of the green roof; however, results are not critical nor put the stability and functionality of the prefabricated house at risk.*

7. Referencias/References

- AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) (2010)**, Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente (NSR-10). Bogotá Colombia.
- Applied technology council (ATC). (1995)**, ATC-19: Structural Response Modification Factors.
- Casseres E. (1980)**, Producción de hortalizas. Bib. Orton IICA / CATIE.
- Cifuentes L. y Ruiz D. (2007)**, Medición e interpretación de las vibraciones ambientales: Estudios del caso del edificio de Parquaderos "Don Guillermo Castro". Trabajo de grado para aspirar al título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana.
- CODHES (2013)**, Consultoría para los Derechos Humanos y el Desplazamiento (2012). "Desplazamiento creciente y crisis humanitaria invisibilizada". http://www.acnur.org/t3/uploads/media/CODHES_Informa_79_Desplazamiento_creciente_y_crisis_humanitaria_invisibilizada_Marzo_2012.pdf?view=1
- Chopra A. (2001)**, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (2 ed.). USA: Prentice Hall
- CSI (Computers and Structures Inc). (2012)**, SAP 2000. Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures, Nonlinear.
- Emiliani N., Rincón J y Ruiz D. (2012)**, Estudio del comportamiento dinámico en el rango elástico de tres edificios de concreto de la Pontificia Universidad Javeriana mediante vibraciones ambientales. Trabajo de grado para aspirar al título de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Javeriana
- FOPAE (Fondo de prevención y atención de emergencia) (2010)**, Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sismo resistente de edificaciones.
- Forero C. y Devia A. (2012)**, Sistema productivo de techos verdes en comunidades vulnerables. Estudio de caso en el barrio La Isla, Altos de Casuca en Soacha, Cundinamarca. Ambiente y Desarrollo, 16 (30), 21-35.
- Forero C., Devia C., Torres A., Mendez S. (2012)**, Diseño de ecotechos productivos para poblaciones vulnerables. Acodal 28 – 36.
- Mogollón M. (2012)**, Ensayos de laboratorio de paneles prefabricados de concreto para viviendas prefabricadas. Proyecto Social Universitario. Pontificia Universidad Javeriana.
- Oviedo N., Torres A. (2013)**, Hydric Attenuation and Hydrological Benefits from Productive Green Roofs installed in Soacha, Colombia. Seminario Internacional UrbanGreen, 16 a 17 de mayo de 2013, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá.
- Ruiz, D. Otálora C. y Rodríguez J. (2007)**, Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas, sobre edificaciones residenciales de mampostería simple en Colombia. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol. 7, No. 2, Diciembre.
- Ruiz, D. Borrero M., León M. y Vacca H. (2013)**, Estimación de la incertidumbre aleatoria de la distorsión sísmica de entrepiso de pórticos de concreto reforzado considerando la variabilidad del módulo elástico del concreto de Bogotá. Revista de Ingeniería de Construcción. Vol. 28, No. 1 Abril.



Secretaría Distrital del Medio ambiente (2011), *Guía de Techos verdes en Bogotá.* www.oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa.../guia_de_techos_verdes_2011.pdf. Fecha de consulta Noviembre 2013.

Zabala A., Gutiérrez J. y Ruiz D. (2012), *Identificación modal a partir de vibraciones ambientales para puentes peatonales metálicos por medio de la metodología NEXT/ERA.* Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Vol. 86, Abril-Junio 2012.

