

Analysis of the state of the structure of a bus stop subjected to loads exerted by a green roof, case study: Bogotá, Colombia

Análisis del estado de la estructura de un paradero de buses sometido a cargas ejercidas por un techo verde, caso de estudio: Bogotá, Colombia

O. Contreras *, F. Nunez **

* Universidad Católica de Colombia – Bogotá, COLOMBIA

** Pontificia Universidad Javeriana – Bogotá, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 20/12/2018

Fecha de Aceptación: 30/08/2019

PAG 34-44

Abstract

This article presents the analysis of the structural conditions of four modified bus stops with the change of a load represented by a green roof in the city of Bogotá. The methodology has two phases for accounting the bus stop behavior; As a first step, a finite element model was the main tool to compare the critical stresses of the structure before and after the use of the green roof, and to observe the location of said stressed areas before the happening of a seismic force; and on the other hand a physical model which is subjected to different frequencies in a shaking table to compare the movement and damage of the structure before and after being modified. An increase in stresses of about 80.57% took place by the connection between the column and the central beam, however, given that this value is less than the yield limit of the material, it can be said that the structure will not suffer damage due to the green roof additional load.

Keywords: stress, response spectrum, yield, modeling, green roof

Resumen

Este artículo presenta el análisis de las condiciones estructurales de cuatro paraderos de buses modificados con la incorporación de una carga representada por un techo verde en la ciudad de Bogotá. La metodología se compone de dos fases para la aproximación del comportamiento del paradero de buses; como primera medida se desarrolló un modelo computacional con el fin de comparar los esfuerzos críticos de la estructura antes y después de la instalación del techo verde, y observar la ubicación de los mismos ante la acción de una fuerza sísmica. Posteriormente se realizó un modelo físico el cual fue sometido a diferentes frecuencias en una mesa vibratoria con el fin de comparar el movimiento y los daños de la estructura antes y después de ser modificada. Se encuentra un aumento de aproximadamente un 80,57 % en el esfuerzo que siente la conexión entre la columna y la viga central, sin embargo, dado que dicho valor es menor que el límite de fluencia del material, se puede decir que la estructura se encuentra en el rango elástico pese a la implementación del techo verde.

Palabras clave: esfuerzo, espectro de respuesta, fluencia, modelación, techo verde

1. Introducción

En la actualidad, la seguridad que inspiran las estructuras en la ciudadanía es el punto de partida para que las comunidades pongan su confianza en manos de la ingeniería civil para la construcción de sus hogares, sitios de estudio, de trabajo, vías de comunicación etc.

La ingeniería civil a través de sus profesionales está llamada a cuidar la infraestructura de su entorno. El análisis de las construcciones en una comunidad juega un papel importante ante la necesidad de entender el comportamiento de las estructuras como consecuencia, por ejemplo; de un evento sísmico.

El estado de conocimiento en la ingeniería estructural avanza paulatinamente, y es una herramienta mediante la cual es posible mejorar la integridad de estructuras antiguas, estructuras cuyo uso fue alterado, donde se presenten cargas no planeadas, o en estructuras que fueron construidas antes de la publicación del último código de construcción sismo resistente (El-Betar, 2016). En el diseño y construcción de las estructuras se busca un grado de ductilidad en sus elementos que le permitan deformarse lo suficiente para indicar una anomalía antes de colapsar a causa de un movimiento sísmico (El-Betar, 2015).

¹ Autor de correspondencia:

Universidad Católica de Colombia – Bogotá, COLOMBIA
E-mail: ocontreras25@ucatolica.edu.co



Con el fin de investigar el estado en el que se encuentra una ciudad respecto a sus condiciones para afrontar un sismo, se plantean metodologías para la gestión del riesgo que representa la acción de dicho evento. Por ejemplo; la metodología "Radius" referente a la planeación y reducción del riesgo sísmico incluye un plan de prevención, un plan de emergencia, y las acciones de reconstrucción y de recuperación (Boukri et al., 2018). Para el caso colombiano la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) presenta una metodología para la gestión del riesgo, la cual se compone de tres fases; conocimiento del riesgo, reducción del riesgo y manejo de desastres (Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, 2015). La presente investigación busca aportar a la fase del conocimiento del riesgo a través del estudio de las condiciones estructurales en las que se encuentran los paraderos de buses que fueron modificados al implementar un techo verde sobre su cubierta en la ciudad de Bogotá.

Las nuevas condiciones del entorno a las que se ven sometidas las comunidades en todo el mundo a causa de los cambios climatológicos que se viven, son temas de estudio que se alzan frente a un escenario de problemas ambientales complejos para las generaciones venideras. Tecnologías como los paneles solares, para contrarrestar el consumo de energía en una edificación; techos o muros verdes (asociado a una estructura que presenta vegetación) instalados en las estructuras, con el fin de mitigar la contaminación, disminuir los niveles de temperatura o realizar gestión de aguas lluvias; entre otros (Shafique et al., 2018), representan mecanismos sostenibles para la conservación del medio ambiente. Pensando en dicha problemática, en la ciudad de Bogotá se instalaron techos verdes sobre la cubierta de algunos paraderos de buses de transporte urbano, como parte de la iniciativa del Departamento Administrativo de la Defensoría del Espacio Público (DADEP), la cual busca medir la retención de metales pesados, material particulado, dióxido de carbono, entre otros (Pérez Díaz, 2014).

Este artículo presenta un estudio de la condición estructural de los paraderos de buses de la Capital Colombiana que están expuestos a cargas generadas por techos verdes una vez se presente la ocurrencia de un sismo. A continuación, se presenta la metodología seguida para el desarrollo del proyecto, la caracterización de los paraderos modificados, y las modelaciones hechas para representar el comportamiento de la estructura.

2. Metodología

Dado que el objetivo de este trabajo se centra en analizar la condición de la estructura de los paraderos de buses ante cargas ejercidas por un techo verde estática y dinámicamente, se utilizó la simulación numérica y física como herramienta para observar su comportamiento en diferentes escenarios.

En primera instancia se realizó una búsqueda de información en la literatura y en las empresas que desarrollaron la idea de los paraderos verdes (paraderos de buses con techos verdes en su cubierta) respecto a las dimensiones, materiales, suelo de cimentación y cargas expuestas de la estructura del paradero objeto de estudio. Así mismo se realizó una búsqueda de la composición y peso del techo verde instalado. Mediante el software ANSYS se simuló las condiciones estáticas y dinámicas, en donde se obtuvo el comportamiento aproximado del sistema en condición saturada del techo verde, teniendo en cuenta las características sismológicas de los suelos en donde están cimentados, y por otro lado, en la modelación física cuya construcción se basó en un sistema a escala, se logró observar su comportamiento al ser ensayado en una mesa vibratoria y medir estáticamente su deformación mediante un deformímetro digital.

3. Caracterización del paradero verde

Actualmente la ciudad de Bogotá cuenta con 8 paraderos verdes, distribuidos en las localidades de Chapinero, Kennedy, Engativá, Fontibón y Santa Fe, tal y como se muestra en la (Figura 1). Los puntos rojos representan los lugares en donde están distribuidos los paraderos verdes. Cada punto indica dos paraderos verdes seguidos.



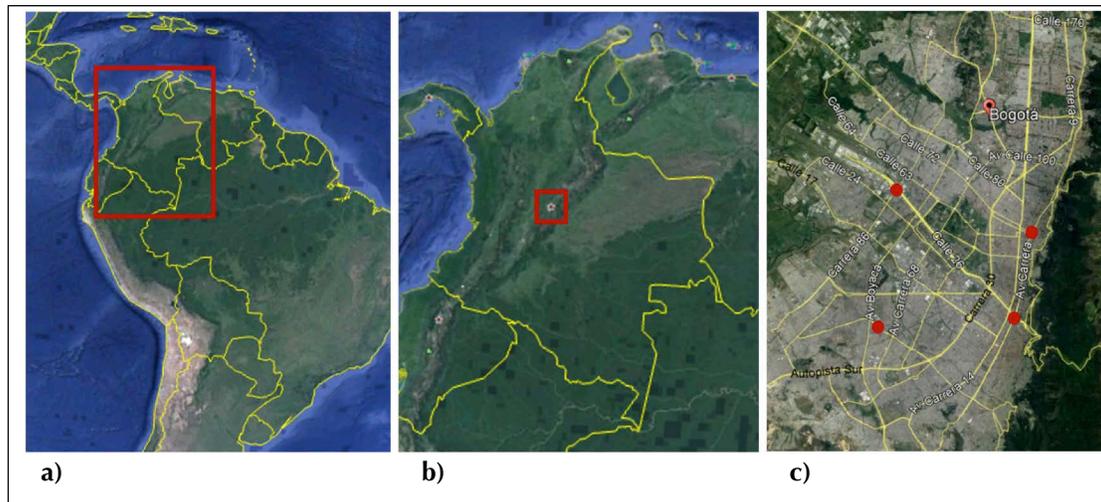


Figura 1. Localización de los paraderos verdes. a.) Colombia, b.) Bogotá, c.) Localización de los paraderos verdes en la ciudad de Bogotá

Los paraderos verdes están compuestos por tres columnas y tres vigas que representan la resistencia del sistema, a su vez el techo verde se considera como el elemento diferenciador respecto a las cargas, ver (Figura 2).



Figura 2. Paradero verde

El paradero verde también está conformado por una banca, un pórtico metálico destinado para afiches publicitarios y separado de la estructura principal, dos canaletas que conectan las vigas en voladizo entre sí, seis cordones que unen dichas vigas con la cubierta inicial, y por último el techo verde instalado sobre la cubierta anteriormente mencionada. Este último está compuesto por una capa de sustrato (medio de crecimiento de la vegetación) ultra liviano (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2014) y una capa vegetal que incluye plantas de la especie Sedum, dada su resistencia a cambios bruscos de temperatura como los de la ciudad de Bogotá. A continuación se presenta la (Tabla 1), en la cual se resumen los resultados obtenidos del análisis de cargas del paradero verde. Esta información es la base para la construcción del modelo computacional.



Tabla 1. Análisis de cargas del paradero verde

Elemento	Material	Carga lineal (kN/m)
Cubierta inicial	Polipropileno de 3 mm	0,081
Cordón transversal	Acero inoxidable de 1,5 mm	0,0035
Canal delantero	Acero inoxidable de 1,2 mm	0,0395
Canal posterior	Acero inoxidable de 1,2 mm	0,0474
Techo verde	Sustrato ultraliviano y plantas especie Sedum	1,14

3.1 Modelo numérico de la estructura

El paradero verde se contempla como un sistema geoméricamente simétrico respecto a sus elementos principales de resistencia. Las cargas se distribuyen en función del área aferente que posee cada viga. Dado que los elementos centrales están expuestos a una carga mayor a causa del área de influencia del mismo, se modeló la columna y la viga de la mitad del sistema a través del software ANSYS, y se analizó dicho modelo utilizando el método de los elementos finitos. Este modelo se construyó a partir de la obtención de su geometría, sus propiedades mecánicas, y la definición de condiciones de frontera respecto a restricciones de movimiento y aplicación de fuerzas externas.

3.2 Geometría

Se utilizó el software Inventor especializado en diseño, para la elaboración de la geometría detallada del modelo. La (Figura 3) presenta la sección transversal de los dos elementos principales respecto a la geometría del sistema. La columna posee una geometría irregular cuya área disminuye en función a la altura de la misma. Por otro lado, la viga contempla una sección transversal rectangular que al igual que la columna, se reduce en función de la distancia al centro del paradero.

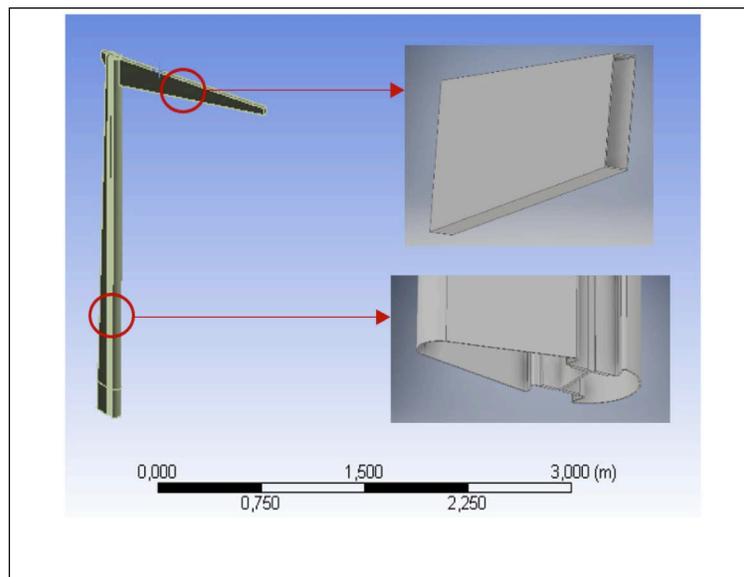


Figura 3. Modelo computacional del paradero verde

Este sistema está elaborado con acero inoxidable AISI 304, el cual posee un esfuerzo de fluencia de 241 MPa, una resistencia última a la tracción de 586 MPa, una resistencia a impacto Charpy V-notch igual o superior a 325 J, y un alargamiento a la rotura del 60% (ASM International, 2000).

3.3 Condiciones de frontera

La restricción de movimiento del modelo está dada en función a la cimentación del sistema. El paradero posee dos capas de cimientos de concreto de 20.68 MPa, las cuales permiten anclar las columnas mediante cuatro pernos, de modo tal que se limita el desplazamiento de la zona inferior de la columna. Se analizó la transmisión de cargas expresadas en la (Tabla 1), con el fin de obtener una línea de presión al final de la viga. La (Tabla 2) muestra la carga lineal mayorada correspondiente al ancho de las vigas. Puesto que la carga es mayor en la viga central a causa de poseer un área aferente más amplia que las vigas de los extremos, se analizó en el modelo computacional la columna y la viga central de la estructura.

Tabla 2. Cargas del modelo

Elemento	Carga muerta (kN/m)
Viga central	19,20
Viga del extremo	11,34

La fuerza sísmica para el análisis dinámico del paradero se modeló mediante los espectros de respuesta de la microzonificación sísmica de Bogotá (Ingeominas y Universidad de los Andes, 1997) para cada tipo de suelo sobre el que están cimentados los paraderos verdes. La (Figura 4) muestra la relación entre la aceleración del suelo y el periodo estructural, se observa que para un suelo piedemonte, las aceleraciones del suelo pueden repercutir en movimientos de la estructura con periodos cortos. De modo tal que se esperan los máximos esfuerzos en el suelo piedemonte debido a la poca altura de la estructura analizada.

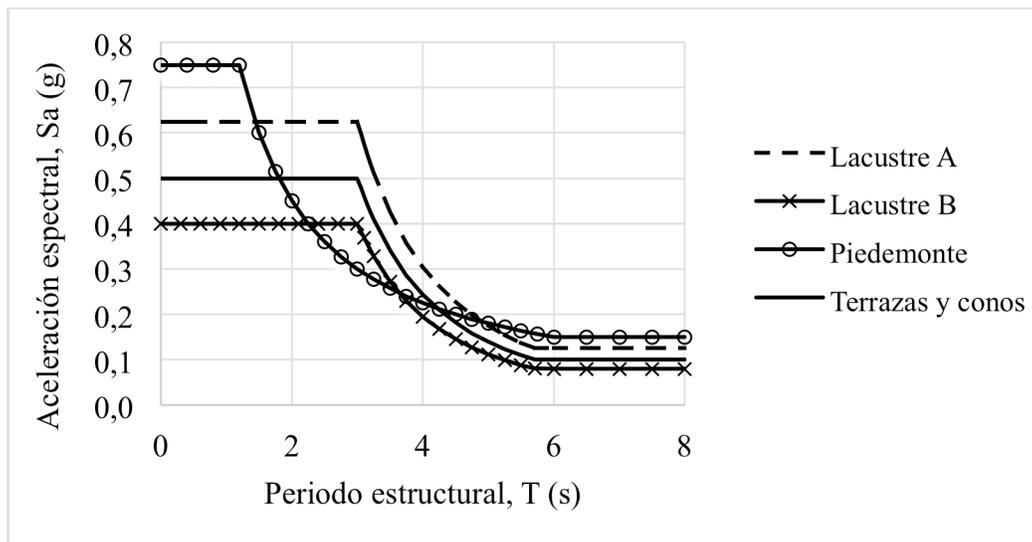


Figura 4. Espectros de respuesta de los suelos de cimentación de los paraderos verdes

El objetivo de la simulación computacional radica en la comparación del comportamiento del sistema estructural en términos de esfuerzos en condiciones normales (sin tener en cuenta el peso del techo verde) y en condición modificada (considerando el peso del techo verde)



4. Modelación física

Con el fin de observar el comportamiento de la estructura a escala, se construyó un modelo físico del paradero verde. Para la construcción del modelo físico se utilizaron secciones cortadas con una máquina CNC sobre cartón paja, unidas con silicona líquida. Dicha modelación física ha mostrado ser una herramienta conceptual valiosa dada la capacidad de este material en simular de manera asertiva fenómenos elásticos e inelásticos comparados con ensayos hechos en elementos de acero a escala real (González Rincón et al., 2016). La (Figura 5) muestra dicho modelo. La modelación del empotramiento (cimentación) se realiza utilizando masilla epóxica en la unión de la zona inferior de la columna a un elemento rectangular de madera que simula el suelo sobre el cual está cimentado, esta sección presenta agujeros circulares con el fin de anclar el sistema a una mesa vibratoria en donde se analiza el comportamiento dinámico del mismo. Por otra parte, la carga es representada por fragmentos metálicos que, a su vez, son utilizados posteriormente para el análisis del comportamiento estático del sistema.

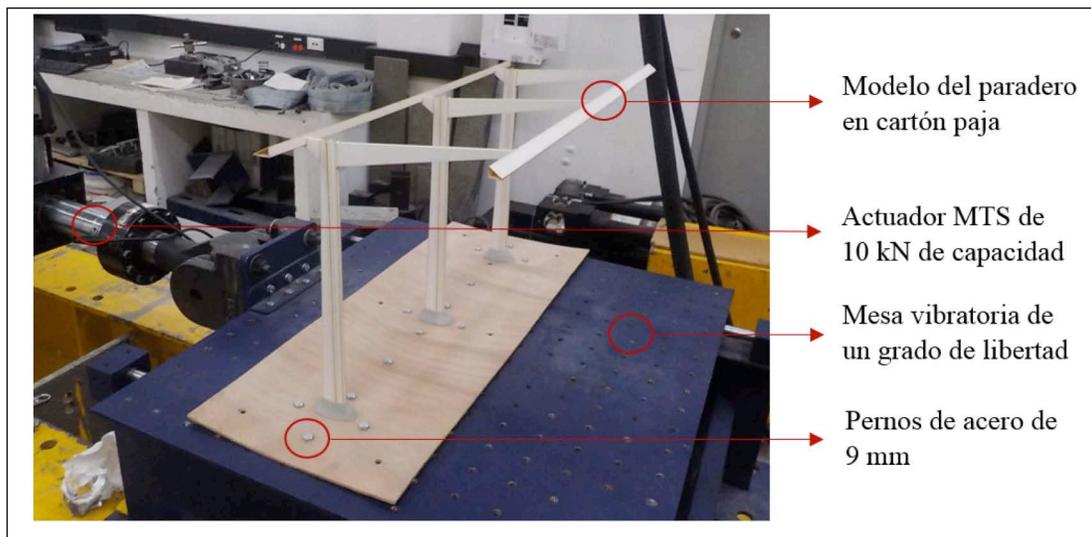


Figura 5. Modelo físico del paradero verde

Dado que el peso de la estructura y del techo verde es conocido, se realizó una relación directa con el peso del modelo físico, cuyo objetivo fue hallar la carga representativa del techo verde en el modelo a escala.

4.1 Protocolo de carga

Inicialmente se sometió el modelo del paradero original a frecuencias desde 1 Hz que aumentan paulatinamente hasta 10 Hz, con una amplitud de 1 cm en la mesa vibratoria, posteriormente el segundo modelo que incluye la carga del techo verde simulada por elementos metálicos implementados en sentido longitudinal de la viga en voladizo, se sometió a las mismas condiciones de frecuencia y amplitud.

5. Resultados y discusión

A continuación, se presentan los resultados obtenidos del análisis estático y por espectro de respuesta teniendo en cuenta las características sísmicas del suelo, también son reportados los daños observados en el modelo físico, los desplazamientos máximos del sistema, y el aumento de los esfuerzos del paradero en su condición inicial cuando se implementa un techo verde sobre su cubierta.

La (Figura 6) muestra el área de esfuerzos máximos de la estructura con un análisis por espectro de respuesta bajo la carga de un techo verde. La conexión entre la columna y la viga, y la zona inferior de la columna son áreas sensibles a esfuerzos, y por ende, un momento flector en sentido contrario a la carga se produce alrededor de estas zonas. El esfuerzo máximo simulado es de 50,59 Mpa, comparado con el esfuerzo de fluencia del material que es de 241 MPa.

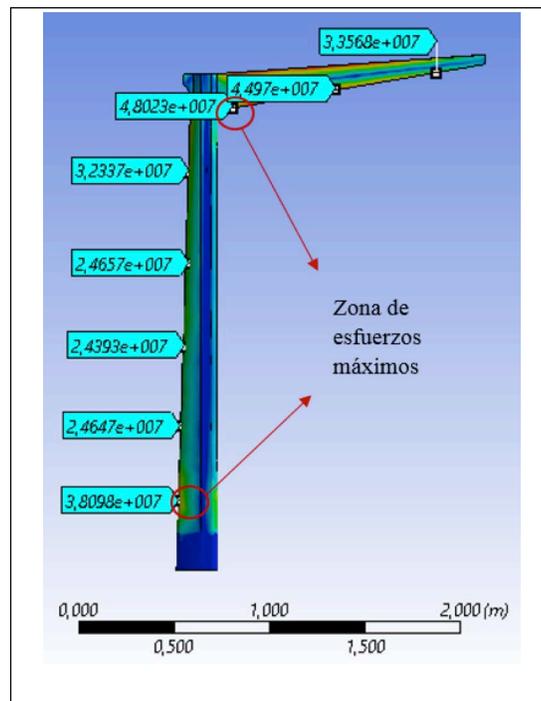


Figura 6. Localización del esfuerzo máximo en el análisis de espectro de respuesta

Los paraderos verdes están distribuidos en la ciudad de Bogotá considerando suelos diferentes. La (Figura 7), permite observar la influencia del suelo en el comportamiento de la estructura respecto a los esfuerzos generados. Se evidencian esfuerzos máximos para el suelo piedemonte, considerado como el más rígido de los cuatro suelos que se comparan.

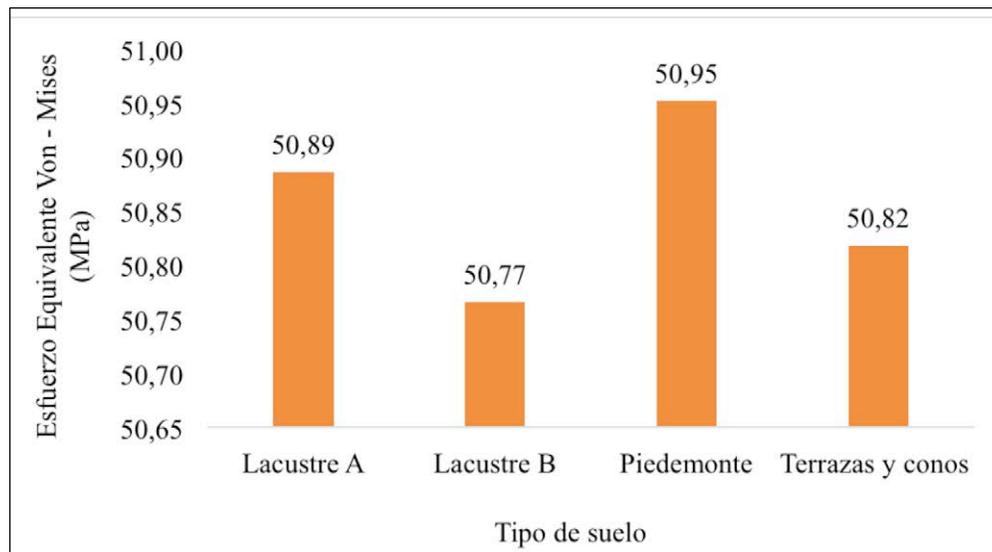


Figura 7. Esfuerzos máximos en función al suelo de cimentación



El modelo físico se ancló en una mesa vibratoria. Se observó un aumento en la amplitud del movimiento de la viga cuando el modelo incorporó la carga que simuló el peso del techo verde. Por otro lado la (Figura 8) permite observar una anomalía registrada en la base de la columna después de aplicado el protocolo de carga, en donde se encuentra una zona susceptible a esfuerzos.

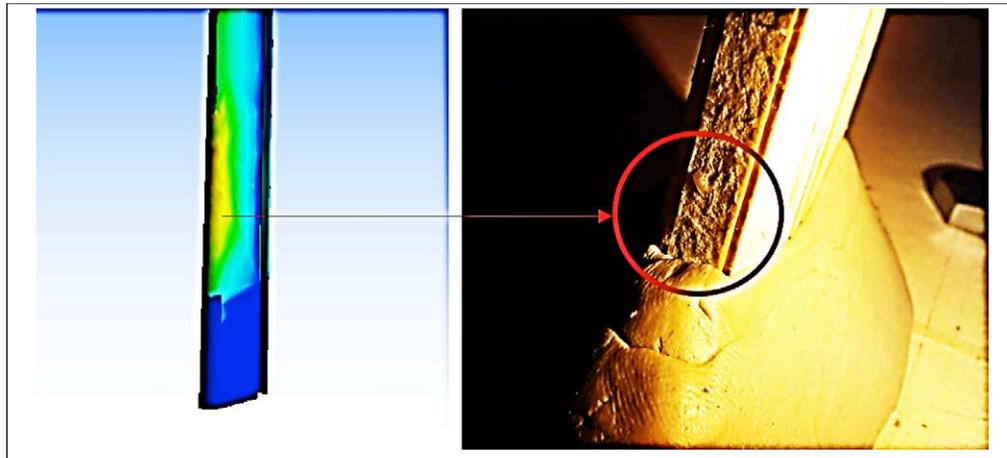


Figura 8. Daños en el modelo físico en términos de pandeo local en la aleta

También se realizaron ensayos relacionados con la deformación de la estructura. El modelo computacional indica que en el extremo de la viga en voladizo como era de esperar, se presentan los desplazamientos más grandes. Se toman mediciones de deformación de ese punto y dado que el deformímetro digital utilizado genera un desplazamiento extra en el modelo físico, se registran mediciones cinco segundos después de implementar la carga que representa el techo verde. Se registran 30 medidas, cuya media es 2,14 mm, con una desviación estándar de 0,061 mm y un coeficiente de variación de 2,86. Este análisis estadístico permite sugerir que los datos son confiables.

En la modelación computacional es de esperar que las deformaciones máximas se presenten en el extremo de la viga, puesto que en su configuración geométrica está en voladizo. Para el punto de máxima deformación en la viga central, la modelación arroja una magnitud de 6.72mm, en condición saturada del techo verde. El aumento del desplazamiento máximo del sistema es del 81.69% respecto a las características originales del paradero. Ver (Figura 9).

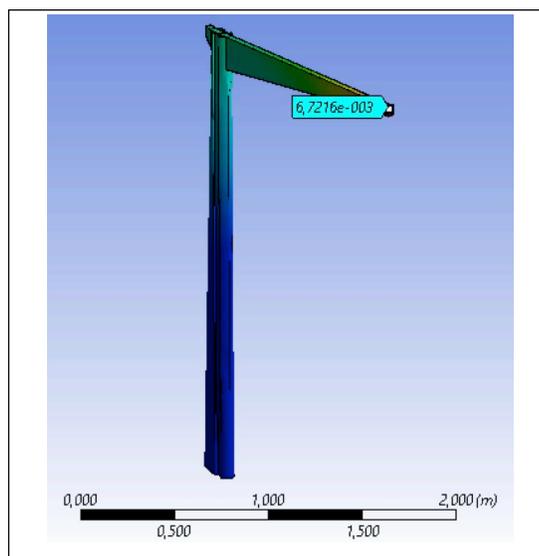


Figura 9. Localización del desplazamiento máximo en el análisis estático

La (Figura 10) muestra un esquema en donde se refleja desde una perspectiva estática la acción del techo verde sobre la estructura. Es necesario mencionar que una vez la carga del techo verde se implementó, la conexión entre la columna y la viga en voladizo también experimentará un aumento de los esfuerzos. La (Figura 11) presenta los valores de los esfuerzos obtenidos del modelo computacional.

Dichos esfuerzos son calculados a partir del criterio de fluencia de Von Mises, este criterio permite conocer si el material bajo el estado de carga simulado se encuentra cerca de la fluencia. Al implementar un techo verde sobre la cubierta de los paraderos de buses, la masa del sistema aumenta un 211.41% teniendo en cuenta un estado saturado del sustrato del techo verde. Así mismo el esfuerzo máximo al que están sometidos los elementos estructurales del paradero aumenta un 80.57 %.



Figura 10. Representación de la acción de la carga del techo verde sobre la estructura del paradero

Tanto para un análisis dinámico como para un análisis estático, la magnitud de los esfuerzos que se presentan en la conexión mencionada anteriormente aumenta considerablemente, sin embargo el punto de fluencia del material con el cual está construido la estructura sigue siendo superior a estos valores, por lo que se podría mencionar que se espera que la estructura del paradero no colapse a causa del incremento en los esfuerzos que presenta.



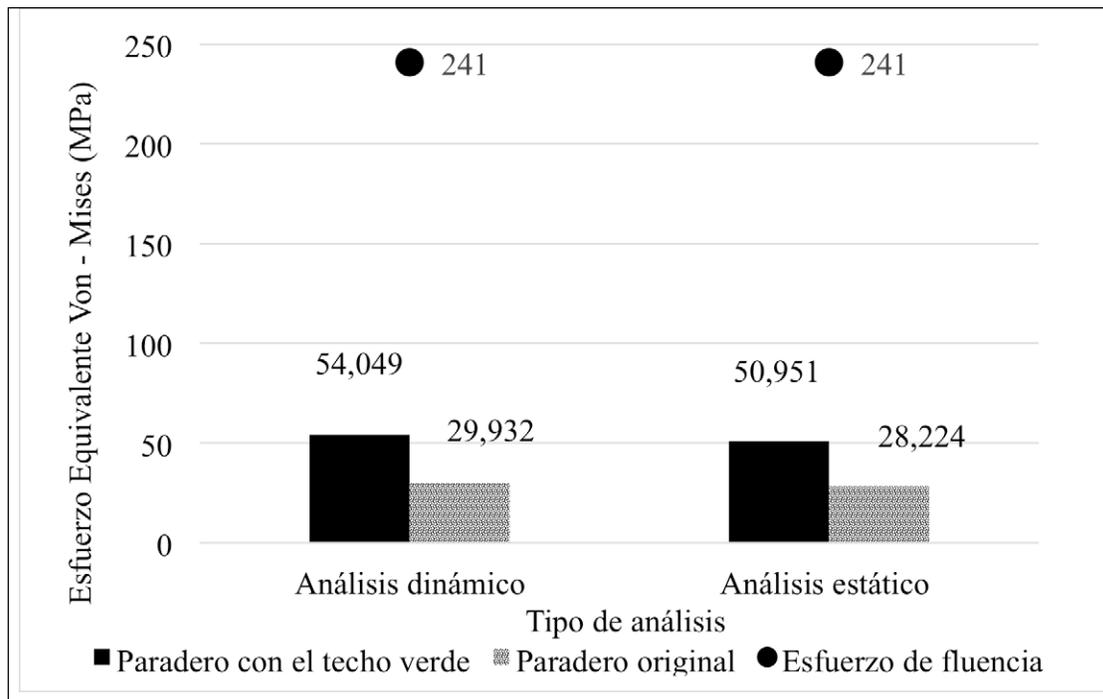


Figura 11. Comparación de esfuerzos antes y después de la implementación del techo verde

La instalación de techos verdes sobre los paraderos de buses implica la posibilidad de generar incertidumbre en su comportamiento estructural. En primera instancia, la sobrecarga en la cubierta del paradero, aumenta el esfuerzo de los elementos estructurales que sirven de soporte al techo del mismo; por otro lado, el tipo de suelo en el que se encuentra cimentada la estructura, afecta la frecuencia de vibración de una onda sísmica que se propaga debido a cambios de rigidez (Ingeominas y Universidad de los Andes, 1997).

Dada la variabilidad del suelo sobre los que se encuentran cimentados los paraderos verdes, estos pueden presentar diferentes comportamientos frente a la acción de una onda sísmica. De esta manera, la demanda de acción sísmica no solo se presenta en función de la masa (que para el caso de estudio se modificó con respecto a un diseño original), sino también de la aceleración pico del suelo de cimentación.

6. Conclusiones

El desarrollo de modelos computacionales permite observar aproximaciones del comportamiento de una estructura sometida a cargas sísmicas, y cargas que no se consideraron inicialmente en el diseño. Se modeló el paradero verde sometido a fuerzas sísmicas en función del suelo sobre el que están cimentados y se encuentra una mayor afectación en los paraderos que se sitúan sobre suelos clasificados como piedemonte; este comportamiento se debe a los periodos estructurales cortos que sufriría el paradero ante altas aceleraciones del suelo. Así mismo se logra evidenciar que las deformaciones máximas ocurren en el punto más alejado de la viga en voladizo.

Por otro lado el modelo físico se ajustó al modelo computacional en la medida que se encontraron daños en el material del modelo físico en las zonas de mayores esfuerzos que presentó el software. Dichos daños fueron ocasionados por el sometimiento de las fibras externas a esfuerzos de tracción cuando la estructura se desplazaba por el movimiento sísmico simulado por la mesa vibratoria.

El criterio de fluencia de Von – Mises permitió conocer el estado que presenta la estructura una vez se incrementa la carga que soporta el paradero por el techo verde implementado. Se evidencia un incremento aproximado de esfuerzos del 80,57 % en la conexión viga – columna, sin embargo este valor se encuentra por debajo del límite de fluencia del material, lo que indica que a pesar de poseer una carga agregada, la estructura resiste satisfactoriamente el techo verde.

Por último se evidenció en el ensayo realizado en la mesa vibratoria, que el mecanismo de falla simulado en el modelo físico es el pandeo local de la lámina, dados los daños que se lograron observar después de aplicado el protocolo de carga.

7. Referencias

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2014).** Paraderos verdes. Retrieved from <http://www.oid.gobiernobogota.gov.co/prensa/93-noticias/929-dadep-propone-transformar-los-paraderos-y-espacios-publicos-de-bogota>
- ASM International. (2000).** Introduction to Stainless Steels. In J. R. Davis (Ed.), *Alloy Digest Sourcebook: Stainless Steels* (ASM Intern, pp. 1–6). <https://doi.org/10.2464/jilm.37.624>
- Boukri, M., Farsi, M. N., Mebarki, A., Belazougui, M., Ait-Belkacem, M., Youf, N., ... Amellal, O. (2018).** Seismic vulnerability assessment at urban scale: Case of Algerian buildings. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31(June), 555–575. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.06.014>
- El-Betar, S. A. (2015).** Seismic performance of existing R.C. framed buildings. *HBRC Journal*, 171–180. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2015.06.001>
- El-Betar, S. A. (2016).** Seismic vulnerability evaluation of existing R.C. buildings. *HBRC Journal*, 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.09.002>
- González Rincón, M. C., Nariño Salamanca, M. A., Hurtado Tinoco, J. D., & Núñez Moreno, F. A. (2016).** Modelación de fenómenos elásticos e inelásticos en miembros de acero, sin acero. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería ACOFI*.
- Ingeominas, & Universidad de los Andes. (1997).** Microzonificación sísmica de Bogotá. Bogotá D.C.
- Pérez Díaz, V. (2014, June 4).** Los paraderos de la capital del país que se volvieron jardines. Bogotá D.C. Retrieved from <https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/los-paraderos-de-la-capital-del-pais-que-se-volvieron-jardines-2129931>
- Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018).** Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90(April), 757–773. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.006>
- Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. (2015).** Plan Nacional De Gestión del Riesgo de Desastres. Bogotá. Colombia

