

COMPORTAMIENTO DE EDIFICIOS INDUSTRIALES TÍPICOS QUE UTILIZAN TECHOS PREFABRICADOS TIPO DOBLE T DURANTE LOS TERREMOTOS OCURRIDOS EN ENERO Y MAYO 2020 EN PUERTO RICO¹

José O. Guevara²

RESUMEN: Los terremotos recientes ocurridos en enero y mayo de 2020 en Puerto Rico ha puesto de manifiesto la vulnerabilidad de edificios industriales que usan vigas de hormigón pretensado tipo doble-T, debido a conexiones deficientes e insuficiente longitud de apoyo entre las vigas doble T y las vigas de apoyo que son vigas prefabricadas. Estas vigas muchas veces están apoyadas en ménsulas de hormigón lo que representa un riesgo adicional. En los puntos de apoyo se ha observada desplazamientos en las juntas que causan grietas diagonales y separación de las angulares relacionadas a la transferencia horizontal entre las viguetas y vigas de apoyo. En esos apoyos hay una carencia de capacidad por cortante y poca ductilidad debido a la conexión que está compuesta por placas de metal incrustadas al alma de las viguetas y angulares a lo largo de una de las aristas de las vigas prefabricadas.

Palabras clave: conexiones, vigas doble-T, vulnerabilidad

BEHAVIOR OF TYPICAL INDUSTRIAL BUILDINGS USING PREFABRICATED DOUBLE-T-TYPE ROOFS DURING EARTHQUAKES IN JANUARY AND MAY 2020 IN PUERTO RICO

ABSTRACT: The recent earthquakes that occurred in January and May 2020 in Puerto Rico have revealed the vulnerability of industrial buildings that use prestressed concrete double-T beams, due to poor connections and insufficient support lengths between the double-T beams and the supporting beams that are prefabricated. These beams sometimes are supported by concrete brackets representing an additional risk. In the supports, displacements have been observed in the joints causing diagonal cracks and angle separation related to the horizontal transfer between the joists and supporting beams. In these supports there is a lack of capacity due to shear and poor ductility due to the connection made with metal plates embedded in the web of the joists and angles located along the edge of the prefabricated beams.

Keywords: connections, double T beams, vulnerability

INTRODUCCIÓN

En Puerto Rico, existen muchos edificios industriales típicos (fomento industrial) de un nivel construidos con paredes prefabricadas exteriores, columnas de hormigón reforzado con “brackets” y vigas prefabricadas soportadas en las ménsulas de las columnas y sobre las cuales se tienen las vigas pretensadas doble T. Su uso data desde los años 50 donde se construyeron edificios típicos con esta configuración (Nasser, et al., 2015). Ese uso se ha descontinuado porque no cumple con los códigos actuales de edificación y ahora el uso común son estructuras de acero. La ventaja principal era la facilidad en su construcción y costo reducido. Una limitación, de este tipo de edificación es que están diseñados y construidos para resistir solamente cargas muertas, vivas y viento.

El sistema estructural de estas edificaciones está caracterizado por su gran flexibilidad para permitir deformaciones por temperatura con poca resistencia al cortante y poca capacidad de ductilidad en las conexiones. A pesar de que los códigos adoptados en Puerto Rico a partir de 1987 recomiendan conexiones mecánicas entre elementos estructurales, las estructuras típicas (fomento industrial) fueron construidas antes de revisarse las regulaciones de diseño sísmico y la transferencia de fuerzas entre las secciones doble T y las vigas fue provista a través de planchas de las doble T a angulares de acero adosados a las vigas y que no estaban diseñadas específicamente para cargas sísmicas (“European Committee for Standardization”, 2005). “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.” BS En 1998-1:2004. Este tipo de conexiones ha ocasionado separación

¹ Artículo recibido el 30 de noviembre de 2020 y aceptado para publicación el 21 de diciembre de 2020.

² Profesor, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico 00681-9000. Email: Jose.guevara3@upr.edu

de las uniones, desprendimientos de la unión de las planchas, grietas que se inician en la unión de las planchas y continúan en las vigas doble T en forma diagonal. Este tipo de conexión puede conducir a la pérdida de soporte en terremotos, siendo la demanda de desplazamiento sísmico para estas estructuras más alta que los pórticos tradicionales de hormigón reforzado.

La alta flexibilidad de este tipo de estructuras hace que el diseño sísmico este gobernado por desplazamientos en la estructura en vez de esfuerzos por lo que esto genera daños a elementos no estructurales, tales como paredes perimetrales típicas de bloque. Al no haber mecanismos de disipación de energía para mejorar su comportamiento sísmico habría que proveer un soporte más flexible (plataforma de neopreno) y conexiones mecánicas para impedir un desplazamiento que genere pérdida de soporte y en adición en las uniones de viga columna reforzar la unión para hacerla monolítica similar a estructuras convencionales de hormigón reforzado, pero elevarían el costo de reparación. El incrementar la longitud del soporte y reforzar la unión con fibra de carbono también mejora el comportamiento de la unión del techo con las vigas, pero habría que reforzar también la unión de viga columna, para lo cual se podrían colocar disipadores de energía.

VULNERABILIDAD DE CONEXIÓN DE VIGA DOBLE T Y VIGAS PREFABRICADAS

La figura 1 muestra una conexión típica donde la longitud de soporte a veces no alcanza 2", aunque también se tienen longitudes de apoyo mayores en la parte exterior tal como se muestra en la figura 2.



Figura 1: Apoyo típico interior de viga doble T.



Figura 2: Detalle típico de soporte interior de viga doble T con mayor longitud de apoyo.

Para pórticos con conexiones articuladas entre vigas y columnas, la disipación de energía durante un evento sísmico es provista por el desarrollo de la articulación en la base de la columna. Estas conexiones son consideradas como articuladas en el análisis estructural y, por lo tanto, no hay resistencia a momento.

Las conexiones de las vigas doble T y las vigas prefabricadas aún con el detalle de planchas soldadas no proveen la acción de diafragma porque las vigas doble T no están conectadas entre ellas (Ghosh; Cleland y Naito, 2017). En regiones de poca sismicidad, la unión típica con planchas funciona bien y la acción de diafragma de las vigas doble T se provee mediante una membrana reforzada que ayuda también a sellar las juntas, aunque las construidas por fomento no tienen un espesor inferior a una pulgada pues su uso fue solo para cubrir los espacios entre juntas. Una membrana de 3" con refuerzo horizontal en ambas direcciones con un refuerzo mínimo podría ser suficiente para que se produzca la acción de diafragma, esta membrana no puede ser colocada ahora pues las estructuras típicas tienen pocas reservas para soportar pesos adicionales.

Las estructuras típicas de fomento no deben ser consideradas como diafragmas, las vigas doble T no están conectadas entre ellas y hay conexiones solo en las vigas de soporte, la membrana fundida in situ no es provista y muchas veces hay aberturas cubiertas con material transparente con propósitos de iluminación. Esto hace que los techos sean muy flexibles sin acción de diafragma y por lo tanto la necesidad de una distribución lateral se produce como una acción de una columna empotrada en voladizo.

La conexión típica es el uso de planchas en las vigas doble T y angulares en las vigas. Este tipo de conexión ocasiona aplastamiento y desprendimiento del hormigón, según se observa en la figura 3.



Figura 3: Desprendimiento de angular y hormigón.

También existe rotación en las juntas entre las vigas doble T y vigas de soporte asociadas a las fuerzas horizontales debidas a sismos. La conexión entre estos elementos es típicamente modelada como articulaciones y no se considera la compatibilidad de desplazamientos y es una de las razones de colapso parcial o total en algunas estructuras en los recientes sismos. De hecho, el contacto entre la doble T y la viga de soporte incrementa la rigidez rotacional comparada con una condición ideal de articulación. Dependiendo de la rotación muchas veces la viga doble T rotará hacia el interior, pero también en sentido contrario lo que producirá una restricción que impida la rotación, pues muchas veces no hay un espacio libre que absorba dicha rotación.

La rigidez alta de las conexiones típicas, junto con la pobre ductilidad, hace que se produzcan fallas frágiles en las conexiones con fuerzas horizontales de gran magnitud ocasionadas por los terremotos recientes. Consecuentemente si fallan estas conexiones, las vigas doble T pierden su restricción y causarán la pérdida de soporte debidas a los terremotos.

VULNERABILIDAD OBSERVADA EN ESTRUCTURAS INDUSTRIALES TÍPICAS CON VIGAS DOBLE T Y VIGAS PREFABRICADAS

La poca longitud de apoyo de algunas estructuras y la carencia de conexiones mecánicas entre los componentes de estas estructuras causaron la mayoría de los daños severos y fallas durante los terremotos de enero y mayo del 2020 en Puerto Rico. La falta de capacidad de transferir las fuerzas horizontales causadas por los terremotos ha inducido acciones que han permitido la pérdida de soportes.

Durante la inspección de este tipo de estructuras, se ha observado detalles de conexiones ineficientes, longitud de apoyos insuficiente, separación inadecuada de elementos no estructurales que han sido la causa de daños no estructurales, tal como se observa en la figura 4.

Para estimar la capacidad de la conexión se establece un factor de seguridad para confirmar la activación de la fricción basada en el mecanismo de la conexión durante el evento.

El factor de seguridad se calcula como la relación entre la capacidad de fricción de la conexión y la demanda de cortante. La demanda de cortante se puede estimar considerando el área tributaria de cada doble T porque no se comporta como un diafragma rígido. La capacidad de fricción por cortante se determina tomando en cuenta la variación axial atribuible al componente vertical de la carga sísmica. Se considera un 100% de participación de masa para el primer modo fundamental de transición y 50% en la dirección vertical. El coeficiente de fricción que se puede realizar como primer estimado varía de 0.2 a 0.25 (“European Committee for Standardization”, 2005).



Figura 4: Grietas en unión de viga doble T y viga prefabricada.

VULNERABILIDAD DE CONEXIONES DE VIGA Y COLUMNA

La mayor parte de los daños han estado asociados a la pérdida de soporte y consecuente falla debido a las conexiones viga columna y en algunos casos a la ruptura del asiento de vigas con el consiguiente colapso de las vigas prefabricadas y vigas doble T. Sin embargo, se ha apreciado desplazamientos y falla de extensiones de columnas hechas con posterioridad a la construcción como elementos de cerramiento, tal como se muestra en la figura 5.



Figura 5: Falla en unión de viga y proyección de columna hecha con posterioridad.

VULNERABILIDAD DE ELEMENTOS DE CERRAMIENTO

Otras fallas observadas fueron los agrietamientos de las paredes de bloque, rotaciones de la base de las paredes prefabricadas, tal como se observa en la figura 6. Se pudo observar que, en caso de paredes de bloque distribuidas regularmente a lo largo del perímetro del edificio con pocas aberturas, los paneles proveyeron suficiente resistencia a cargas laterales con poco agrietamiento. En caso de paredes prefabricadas ancladas en la cimentación con planchas de acero y con patrón irregular de paredes y presencia de ventanas, las paredes de bloque interiores experimentaron agrietamiento diagonal, tal como se observa en la figura 7.



Figura 6: Desprendimiento de hormigón en base de pared prefabricada.



Figura 7: Grietas diagonales en paredes de bloque.

VULNERABILIDAD DE COLUMNAS

Las columnas mayormente sufrieron pérdida de su verticalidad debido a desplazamientos y rotaciones permanentes, también desprendimientos de hormigón en extensiones hechas en columnas por encima de los soportes de las vigas doble T hechas con posterioridad a la construcción principal.

CONCLUSIONES

A la luz de las observaciones de campo después de los terremotos de enero y mayo del 2020 se pudo concluir que a pesar de que no contar con la acción de diafragma, tener uniones soldadas con planchas, las vigas doble T con apoyos superiores a las 4 pulgadas sufrieron daños menores, asimismo las estructuras con paredes de cerramiento de bloque bien construidas se comportaron mejor que las paredes prefabricadas.

Las conexiones viga-columna, viga doble T a viga y paredes prefabricadas a la estructura son los puntos críticos de estos sistemas. Los modos de falla que han experimentado este tipo de estructuras flexibles, cuyo comportamiento está gobernado generalmente por los efectos de segundo orden y demanda de desplazamientos y ha ocasionado pérdidas de soporte de las vigas de soporte y algunas veces de los soportes de las ménsulas de las columnas con detalles de conexión afectados por la velocidad de la construcción.

Las columnas y paredes prefabricadas sufrieron rotaciones y daños en las conexiones en la fundación de paredes prefabricadas, no así las columnas que tenían empotramiento. Solo se observaron daños en columnas en uniones de edificaciones de diferente altura por el efecto de columna corta.

Las vigas doble T, que fueron conceptualizadas como simplemente soportadas no actúan como diafragmas rígidos y son incapaces de transferir y redistribuir las fuerzas sísmicas a los elementos verticales y evitar desplazamientos diferenciales críticos.

La incompatibilidad de desplazamientos entre los elementos estructurales y no estructurales resultaron en desplazamientos permanentes en columnas y paredes. En estos sistemas, la estabilidad lateral está basada totalmente en la acción de voladizo de las columnas y respuesta de la fundación de las columnas, y no pueden depender de las paredes prefabricadas por su conexión que permite rotación.

REFERENCIAS

- European Committee for Standardization (2005). "Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings." BS En 1998-1:2004.
- Ghosh, S. K., Cleland, Ned M., Naito, Clay J., (2017). "Seismic Design of Precast Concrete Diaphragms, NIST GCR 17-917-47".
- Nasser, George D., Tadros, Maher, Sevenker, Adam, Nasser, David (2015). "The legacy and future of American Icon: The precast prestressed concrete double T", *Precast, Prestressed Concrete Institute (PCI) Journal*, p.51.