Daño en Edificaciones Aporticadas de Hormigón Armado de 5 o Más Pisos en la Ciudad de Portoviejo Incluyendo Interacción Suelo-Estructura

Damage In Reinforced Concrete Frame Buildings Of 5 Or More Floors In The City Of Portoviejo Including Soil-Structure Interaction

Autores

Gian Pierre Mosquera Pinargote[1], Pablo Caiza Sanchez[2]

[1]Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo-Ecuador, E-mail: gmosquera9316@utm.edu.ec

[2]Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí-Ecuador, E-mail: pecaiza1@espe.edu.ec

RESUMEN

La ciudad de Portoviejo es la capital de la provincia de Manabí en la región costa, adyacente al Océano Pacífico, del Ecuador en Sudamérica. Esta es una región de muy alta actividad sísmica y caracterizada por la presencia de suelos blandos. Este estudio se concentró en estructuras aporticadas de hormigón armado de 5 niveles o más debido a su gran afectación ante el terremoto del 16 de abril de 2016, presuntamente los daños estructurales se amplificaron por efectos de interacción suelo-estructura. Inicialmente, se emplea la evaluación visual rápida según el método FEMA P-154. Luego, se realizan varios análisis incluyendo el estático no lineal sobre una estructura característica. Finalmente, se plantea el uso de BRB (diagonales de pandeo restringido), como alternativa de reforzamiento para las estructuras que poseen un alto índice de vulnerabilidad, se logra conseguir con el reforzamiento estructural de un modelo una resistencia superior en 140% obteniendo resultados muy favorable en cuanto a comportamiento estructural en cuanto a la interacción suelo-estructura en este caso toma poca relevancia debido a que su resistencia al cortante es muy similar salvo en los desplazamientos que se ven incrementados hasta un 25%, a pesar que se loga reducir la dimensión de los BRB el comportamiento de una estructura incorporando marcos de acero solo logra un 25% de mayor resistencia y 35% de mayor desplazamiento en el mejor de los casos.

Palabras claves: *Desempeño sísmico, Interacción suelo-estructura, Reforzamiento estructural, Vulnerabilidad sísmica*

ABSTRACT

The city of Portoviejo is the capital of the province of Manabí in the coastal region, adjacent to the Pacific Ocean, of Ecuador in South America. This is a region of very high seismic activity and characterized by the presence of soft soils. This study focused on reinforced concrete frame structures of 5 levels or more due to their significant impact during the April 16, 2016 earthquake. It is presumed that structural damages were amplified by soil-structure interaction effects. Initially, a rapid visual evaluation was employed according to the FEMA P-154 method. Then, several analyses were conducted, including non-linear static analysis on a characteristic structure. Finally, the use of BRB (buckling-restrained braces) was proposed as a reinforcement alternative for structures with a high vulnerability index. With the structural reinforcement of a model, a superior resistance of 140% was achieved, obtaining very favorable results in terms of structural behavior. In this case, soil-structure interaction takes little relevance since its shear resistance is very similar, except for displacements that are increased by up to 25%. Despite reducing the dimension of the BRBs, the behavior of a structure incorporating steel frames only achieves 25% greater resistance and 35% greater displacement in the best cases.

Keywords: *Seismic performance, Soil-structure interaction, Structural reinforcement, Seismic vulnerability*

Nota Editorial: Recibido: Junio 2024 Aceptado: Octubre 2024

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los terremotos considerados más dañinos en el país ecuatoriano ocurrió el 16 de abril de 2016 y afectó particularmente las provincias de Manabí y Esmeraldas. Este evento fue seguido por numerosas réplicas con magnitudes de hasta 6.9. [1].

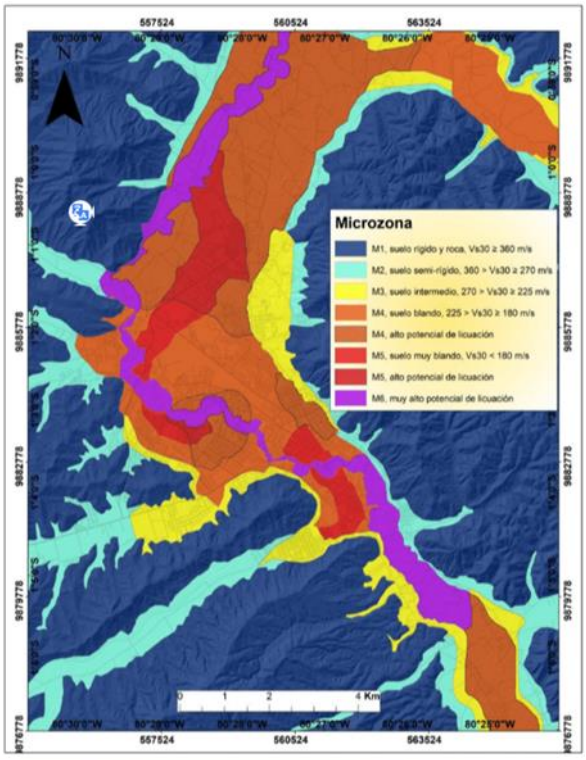
Debido al historial sísmico del país y a las consecuencias que cada uno de ellos ha dejado en el territorio ecuatoriano, los expertos en el campo de la ingeniería estructural han visto la necesidad de realizar estudios de vulnerabilidad sísmica que permitan conocer el estado actual de las edificaciones existentes para así poder determinar su comportamiento ante un evento sísmico [2]. La ciudad de Portoviejo cuenta desde el 2017 con espectros de diseño específicos resultados del estudio de microzonificación sísmica del cantón [3]. Sin embargo, tiene escaso uso por parte de calculistas estructurales, quienes continúan usando los espectros que se indican en la Norma Ecuatoriana de la Construcción del 2015 para analizar y diseñar las estructuras, tanto de hormigón armado como de acero estructural[4].

Además, dentro del análisis del colapso de las edificaciones durante el terremoto del año 2016 en la ciudad de Portoviejo, [5] se establece que varias son las causas que llevaron al desplome a estos edificios, entre la que se destaca por estar relacionadas con el tema de este artículo: 1) La magnitud del sismo reflejada en los espectros de respuesta, obtenidos en la ciudad de Portoviejo, que para el rango de periodos que están alrededor de 0.5 segundos superó notablemente a los espectros que prescriben el Código Ecuatoriano de la Construcción del 2000, y las Normas Ecuatorianas de la Construcción (NEC) de 2011 y 2015. Nótese que, existe una correlación entre el periodo de vibración elástico de las edificaciones de 3 a 6 pisos y el periodo de los suelos blandos, lo que, junto a la magnitud de las cargas sísmicas, explicaría el colapso de alguna de estas edificaciones. Estas deficiencias no solo comprometen la integridad física de los inmuebles, sino que también acarrean considerables pérdidas económicas para los propietarios y la sociedad en general[6].

Se plantea que los efectos de interacción suelo-estructura (ISE) amplificaron los daños, dado que es un fenómeno crítico que puede influir significativamente en el comportamiento sísmico de las edificaciones. Este efecto se debe a la respuesta colectiva del suelo, la fundación y la estructura frente a una excitación sísmica, y puede resultar en daños considerables si no se toma en cuenta adecuadamente durante el diseño y la construcción. Varios investigadores y eventos sísmicos pasados demuestran que para los edificios que descansan sobre depósitos de suelo blando, la ISE juega un papel importante en el aumento de las demandas sísmicas de la estructura y en causar daños adicionales. Ignorar los efectos de la ISE puede conducir a un diseño inadecuado[7].

Como alternativa para reforzar este tipo de estructuras que presentan un pobre nivel de desempeño, la alternativa empleada es vigas de pandeo restringido que representan una solución innovadora para mejorar el desempeño de estructuras que presentan deficiencias. Estas vigas están diseñadas para resistir cargas laterales, como las producidas por sismos o vientos fuertes, minimizando el riesgo de pandeo lateral.

2. DESARROLLO



El estudio de microzonificación sísmica en la ciudad de Portoviejo [3] es un esfuerzo significativo para comprender y mitigar los riesgos asociados con los terremotos. La documentación detallada del subsuelo y los ensayos para calcular la respuesta sísmica en superficie son fundamentales para definir estas microzonas como se muestra en la figura 1, lo que a su vez contribuye a la seguridad y resiliencia de las comunidades en áreas propensas a sismos[8].

Figura 1. *Mapa de microzonas de Portoviejo* [3]

2.1. Recopilación De Datos

La combinación de metodologías cualitativas como FEMA P-154 junto con enfoques cuantitativos basados en normas como NEC 2015 y ASCE 41-17, permite una evaluación integral.

En la figura 2 se muestra la ubicación de las estructuras evaluadas con el FEMA P-154, la cual permitió juntar las características de alrededor de 50 estructuras muchas de estas concentradas en la “zona 0” y sus alrededores de la ciudad de Portoviejo. Se pudo analizar las características reunidas mediante análisis visual en la que se destacan el índice de vulnerabilidad alto, presencia de mezanines, piso blando y geometría de los elementos principal

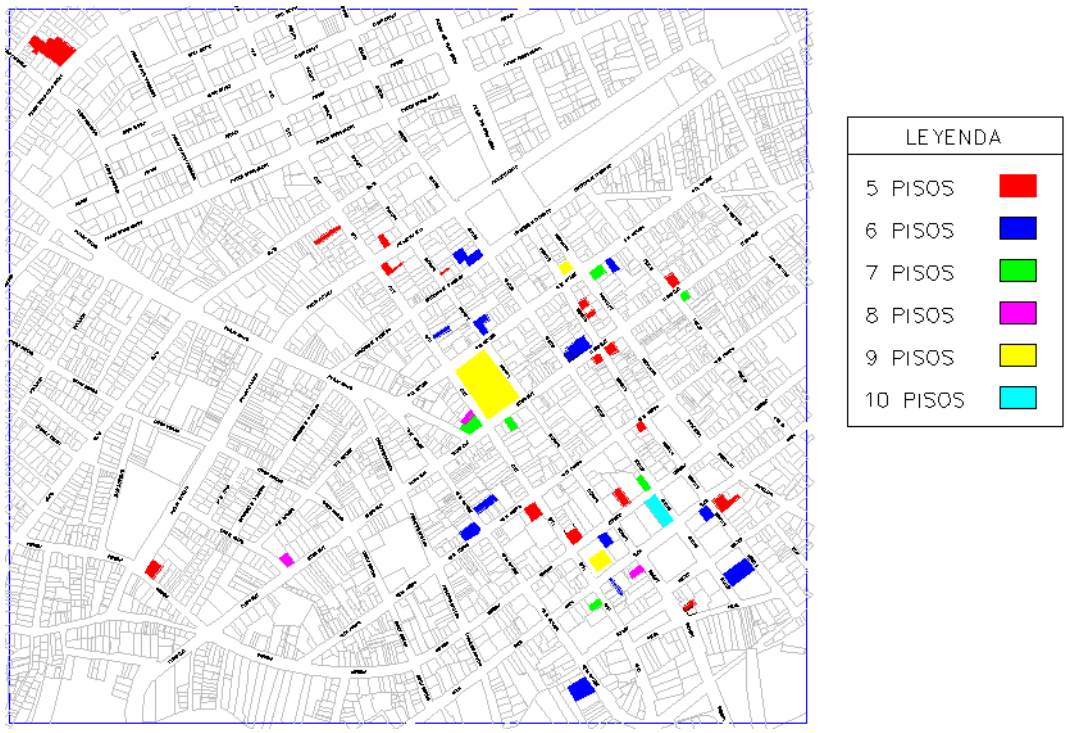


Figura 2. *Mapa de estructuras evaluadas con el FEMA P-154*

En un primer momento, se llevaron a cabo evaluaciones visuales empleando google street view, para determinar el índice de vulnerabilidad de aquellas edificaciones que hasta antes del terremoto del 16A estaban en funcionamiento y sin presencia de daños estructurales mediante FEMA P-154. Este método proporciona un procedimiento de evaluación visual rápida que permite estimar la peligrosidad sísmica y tomar decisiones informadas para la mitigación de riesgos. La implementación de este método contribuye significativamente a la prevención de daños en infraestructuras críticas durante eventos sísmicos.[9]

2.2. Análisis De La Información

Con el levantamiento de la información se elaboraron modelos matemáticos como el que se presenta en la figura 3, el modelo de la edificación está basada en una estructura real, la cual representa las características principales encontradas en las estructuras de 5 pisos ubicadas en la ciudad de Portoviejo.

Esta estructura tiene un aproximado de 15 años de antigüedad y no ha sido reforzada dado que no ha sufrido daños durante el sismo del 16. Las patologías principales presentes en esta estructura es la autoconstrucción ya que fue diseñada para 2 pisos los cuales posteriormente fueron aumentados a 5 sin un previo análisis y la presencia de piso blando. Estas patologías fueron muy habituales debido al poco control municipal y a las ordenanzas vigentes al momento de la construcción y también causantes de varios colapsos estructurales.

Finalmente, pero no menos importante, el suelo es de mala calidad. En efecto, la ciudad de Portoviejo cuenta con un estudio de microzonificación sísmica en el cual se determinó que este edificio está cimentado sobre la microzona m5, que es un suelo muy blando con vs30< 180 m/s con moderado potencial de licuefacción. Que traducido a los parámetros de la NEC-15 sobre el tipo de suelo para la construcción del espectro de respuesta es clasificado como tipo E.

Figura 3. *Modelo 3D de la estructura analizada*

Luego, se realizaron análisis estructurales, los que son cada vez más complejos que permiten tener una idea clara del comportamiento estructural, para determinar posibles causas de fallas o mal comportamiento estructural. Es conocido que los hundimientos diferenciales pueden llegar a ser un fenómeno crítico presente en las estructuras observadas, especialmente en áreas con suelos de baja capacidad portante y estructuras sujetas a cargas significativas. Todos los aspectos que influyen en la respuesta mecánica del suelo bajo condiciones determinadas de cargas no es posible tenerlas en cuenta, por lo tanto, se necesitan idealizaciones tanto del material como de las condiciones de carga, para simplificar la expresión matemática.[10]

La respuesta estructural se determina mediante la curva de capacidad, que representa la relación fuerza-desplazamiento, comúnmente expresada en términos de cortante base versus desplazamiento del techo, medido en un nodo de control específico [11]. En el campo de la estructura el diseño basado en el desempeño es crucial para la resiliencia de los edificios durante desastres naturales como los terremotos. Los tres niveles principales de desempeño estructural —Ocupación inmediata (IO), Seguridad de la vida (LS) y Prevención de colapso (CP)— sirven como puntos de referencia para la integridad de la construcción después del evento.[12]

2.3. Características Del Modelo

La tabla 1 contine las variantes que fueron analizadas en la que se muestran los modelos con la única característica que los diferencia es la cuantía.

Tabla 1. *Variantes de modelos analizados*

	Columnas	Vigas
Modelo 1	Cuantía 1% en columnas	Cuantía requerida
Modelo 2	Cuantía 2% en columnas	Cuantía requerida
Modelo 3	Cuantía 3% en columnas	Cuantía requerida
Modelo 4	Cuantía 1% en columnas	Cuantía requerida – 0,01
Modelo 5	Cuantía 2% en columnas	Cuantía requerida – 0,01
Modelo 6	Cuantía 3% en columnas	Cuantía requerida – 0,01

La razón de estos modelos es representar cuantías de armado “fuertes” y cuantías de armado “débiles” con el fin de representar la ductilidad que puede alcanzar el sistema estructural, detectar posibles fallos y predecir de manera más precisa el comportamiento estructural de la misma, adicional se empleara la misma distribución de acero transversal de la normativa que estuvo vigente al momento de la construcción de la estructura con el fin de no incrementar las variables de estudio y enfocarse en el reforzamiento. Un gran porcentaje de estructuras no contaban con supervisión ni control por parte de las entidades municipales al momento de su construcción, esto incrementaba el margen de error en las fallas anteriormente mencionadas y aumenta la vulnerabilidad de las estructuras que eran producto de la autoconstrucción. En edificaciones de concreto reforzado más que en ningún tipo de construcciones, colocar más material del requerido no es requisito para incrementar la seguridad.[13]

En la tabla 2 se muestra la información de la estructura, que fue levantada in situ, además se empleó el estudio de microzonificación de Portoviejo para determinar las propiedades del suelo.

Tabla 2. *Características de las estructuras*

Longitud x	9,30 m
Longitud y	16,25 m
Número de pisos	5 pisos
Altura de entrepisos	2,88 m
Altura total	14,40 m
Secciones de columnas	0,35x0,35 m
Secciones de vigas	0,30x0,45 m
Espesor de losas	0,20 m
Tipo de cimentación	Zapatas corridas
F'c concreto	21 MPa
Fy barras de refuerzo	420 MPa
Tipo de suelo	Arcilloso
Zona según estudio de microzonificación	M5; vs30 < 180m/s
Capacidad admisible del suelo	85,61 kN/m^2

2.4. Cargas

Para la determinación de la carga muerta se realizó un levantamiento in situ de las áreas de mampostería promedio por piso mostrada en la tabla 3, el calculado de la losa de 3,389 kN/m^2 y para la carga viva se utilizó la reglamentaria de la NEC-15 (NEC-SE-CG) para viviendas de 2 kN/m^2, ya que es el uso principal que se le da al edificio.

Tabla 3. *Resumen del peso de la mampostería presente en la estructura*

Peso específico de ladrillo	1600	kg/m^3
Peso específico de mortero	2200	kg/m3
L	0.29	m
A	0.13	m
e	0.07	m
V	0.002639	m^3
P	4.2224	kg
el peso de 23 ladrillos	0,952	kN/m^2
volumen de 23 ladrillos	0.060697	m^3
volumen m2 de mampostería	0.07	m^3
Peso de mortero	0,201	kN/m^2
Peso enlucido m2 pared	1,294	kN/m^2
Peso de pared	2,448	kN/m^2

La NEC-15 en su apartado de rehabilitación (NEC-SE-RE), recomienda usar unas combinaciones para evaluación sísmica, las cuales se combinan diferentes a las de diseño y se emplearan para evaluar los elementos estructurales de los modelos matemáticos.

- 1.1D + 0.275L + E
- 1.1D + 0.275L – E

Los hundimientos diferenciales representan una falla crítica que puede ocurrir durante un sismo, especialmente si no se han considerado adecuadamente en el diseño estructural. Estos hundimientos se refieren a la desigualdad en los asentamientos del suelo bajo la estructura, lo que puede provocar tensiones inesperadas y daños significativos.

2.5. Reforzamiento

Tras el análisis de estos modelos estructurales, la implementación de refuerzos utilizando BRB (Diagonales de pandeo restringido), en la figura 4 se muestra la ubicación de los marcos reforzados. El sistema de marco con brazos restringidos al pandeo (BRBF) es un sistema de resistencia a fuerzas laterales que se ha utilizado ampliamente en los últimos años. Un brazo restringido al pandeo (BRB) consta de un núcleo de acero dúctil diseñado para ceder bajo compresión o tensión con el fin de absorber la energía introducida en la estructura. Para evitar que el brazo se pandee, se coloca un núcleo de acero dentro de la carcasa exterior de acero, que luego se llena con concreto o mortero. El efecto de confinamiento del concreto evita que el brazo se pandee [14], estas han demostrado ser beneficiosos en proporcionar resistencia contra fuerzas horizontales provenientes de terremotos al mismo tiempo que mejora la disipación de energía capacidad de las estructuras nuevas y existentes.

Figura 4. *Vista en 3D de la estructura reforzada*

Una alternativa al reforzamiento con BRB el cual se emplea cuando los miembros de hormigón armado no son capaces de soportar las fuerzas provenientes de estos elementos de arriostramiento, esta alternativa se basa en emplear un marco de acero que se debe comportar completamente elástico para que la deformación se produzca en la Viga de Pandeo Restringido. Para que este modelo funcione en el modelo matemático se utilizó elementos de conexión entre los elementos de concreto armado y los elementos de acero, dichos elementos de conexión deben poseer rigidez elevada para para garantizar que ambos marcos funcionen como un elemento compuesto, una vez que estos elementos sean modelados y se garantice su trabajo en conjunto se añaden las vigas de pandeo restringido para completar esta alternativa de reforzamiento, el esquema completo se lo muestra en las figuras 5 y 6.

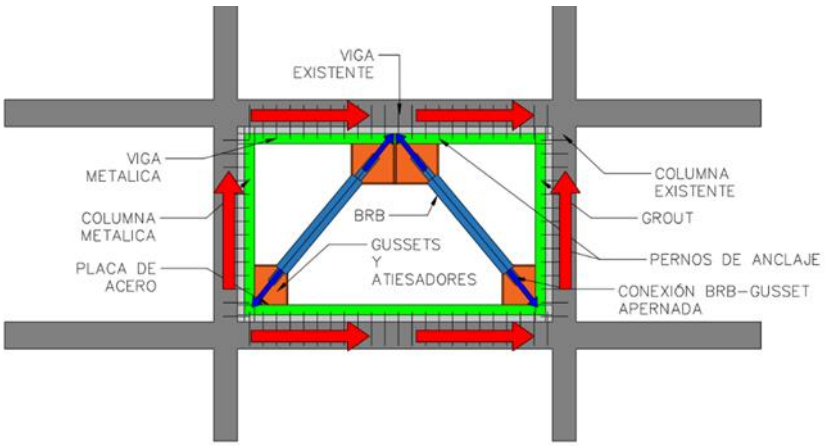


Figura 5. *Modelo conceptual de un pórtico de hormigón armado con marco de acero para considerar un comportamiento compuesto*

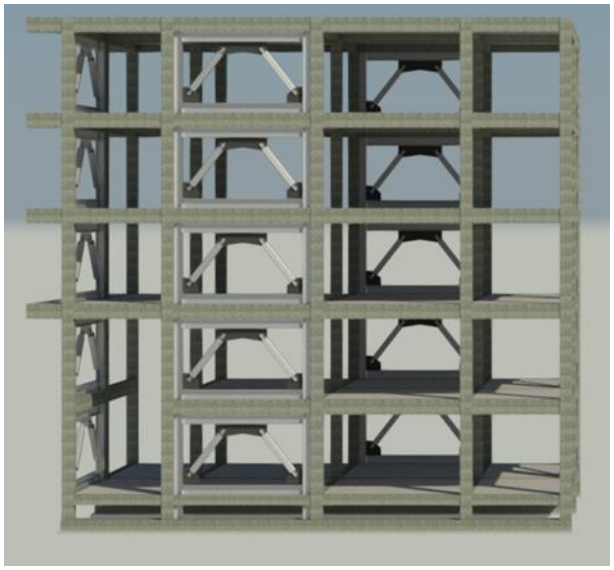


Figura 6. *Modelo 3D de la estructura reforzada con marcos de acero y BRB*

El desempeño sísmico relativo se puede lograr con BRB más pequeños si se considera el comportamiento compuesto entre el marco de acero y concreto reforzado. Esto sugiere que existe una ventaja significativa al incluir el comportamiento compuesto al diseñar modernizaciones BRB y SF de edificios RC. En este caso de estudio, incluir el comportamiento compuesto redujo aproximadamente un 20% el tonelaje de acero BRB requerido [15].

Una vez que el reforzamiento alcanza el nivel de desempeño adecuado se incorpora la interacción suelo-estructura, en la se calcularon los valores de K30 en base a la capacidad de carga del suelo de cimentación de los que se evaluó por medio de los coeficientes de Terzaghi el cual tiene parámetros para suelos arcillosos de baja capacidad, suelo que está relacionado con los que habitualmente encontramos en la ciudad de Portoviejo, el dato que se utilizó para la capacidad de carga de suelo es de 85,61 kN/m^2.

3. RESULTADOS

Se realizó la evaluación del desempeño de los 6 modelos estructurales, verificando en forma prioritaria: periodos de vibración, las derivas de piso y el chequeo de elementos estructurales.

3.1. Períodos

La tabla 4 nos da una idea del comportamiento de la estructura a pesar de tener un comportamiento traslacional (UX y UY) en sus 2 primeros modos, la estructura presenta periodos de vibración más elevados de los esperados si empleamos formulas rápidas para la estimación de la estructura. Para una estructura de 5 niveles se podría esperar que la estructura tenga un periodo de vibración alrededor de los 0,5 segundos, dado que el periodo de la misma presenta un periodo de 1,16 segundos, es un indicador de que se trata de una estructura muy flexible.

Tabla 4. *Periodos y participación de masas de los principales modos de vibración*

Modo	Periodo s	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
1	1.164	0.8043	0	0.8043	0	0.0701	0.0701
2	1.061	0	0.8758	0.8043	0.8758	0	0.0701
3	0.935	0.055	0	0.8593	0.8758	0.8089	0.879

3.2. Derivas

A continuación, en la figura 7, las derivas mostradas están por encima del 2% que nos establece la NEC-15, esto sugiere que hay factores que afectan negativamente el rendimiento estructural, teniendo en cuenta que muchas estructuras no cuentan con espaciamiento suficiente entre ellas (junta sísmica), esto puede repercutir negativamente al comportamiento de la estructura debido al golpeteo con edificaciones aledañas, elevando su nivel de vulnerabilidad.

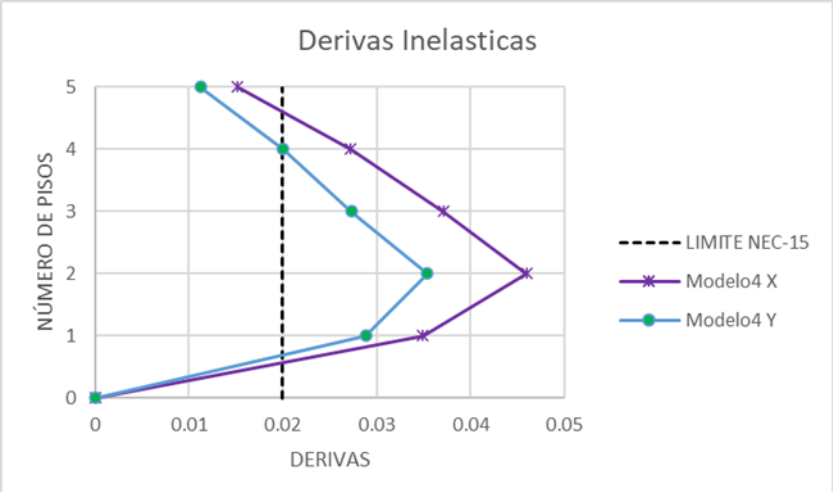


Figura 7. *Derivas máximas de los modelos exceden el límite máximo del 2% establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción*

3.3. Chequeo De Elementos Estructurales

En la figura 8 se puede visualizar el comportamiento más desfavorable de los elementos estructurales dentro de los ejes 3 y B en la que se resalta con rojo las columnas en las que su demanda supero su capacidad hasta un 15% más de lo que puede resistir las columnas y los problemas que presentan referente a efectos de esbeltez y piso blando.

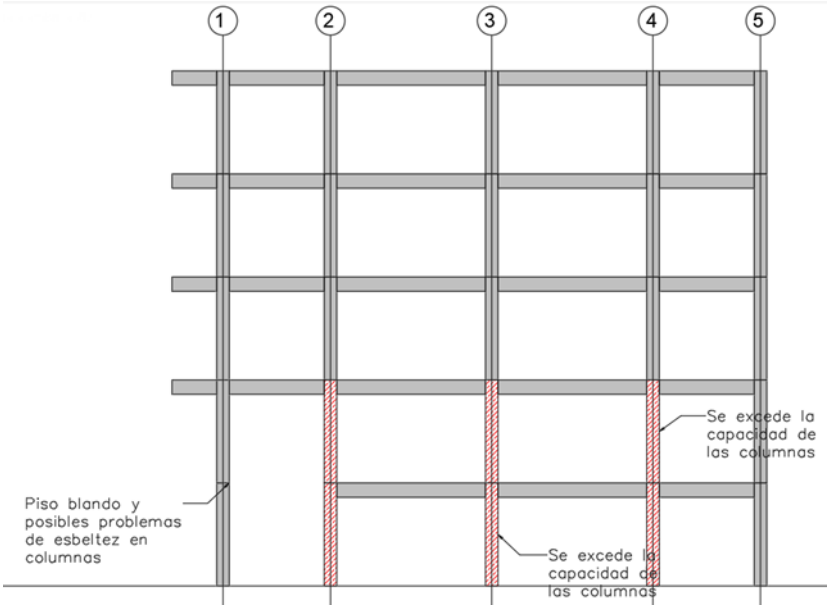


Figura 8. *Vista en elevación donde se resaltan elementos estructurales con probabilidad de falla*

3.4. Desempeño

En la figura 9 se muestra el comportamiento más desfavorable de los modelos analizados, el cual es deficiente debido a la gran flexibilidad que presenta representada en periodos altos y derivas excesivas adicional a su comportamiento frágil mostrado en las curvas. Suponiendo que se presenten asentamientos diferenciales, estas deficiencias se verán incrementadas teniendo como resultado una estructura con una gran probabilidad de colapsar en un futuro evento sísmico. El análisis de la figura N.9 revela que, a pesar de las variaciones en la cantidad de acero y la similitud en el acero transversal, los mecanismos de falla ocurren consistentemente en la misma área. Esto indica que la estructura no posee la ductilidad requerida para absorber y disipar adecuadamente la energía de un sismo, lo que resulta en un riesgo de colapso súbito. La falta de variación significativa en los desplazamientos y cortantes sugiere un diseño estructural inadecuado que no cumple con el nivel de desempeño mínimo (LS) para edificaciones residenciales. Por lo tanto, es imperativo considerar un reforzamiento estructural que mejore la capacidad de la estructura para soportar eventos sísmicos futuros, asegurando así la seguridad y la integridad de la edificación y sus ocupantes.

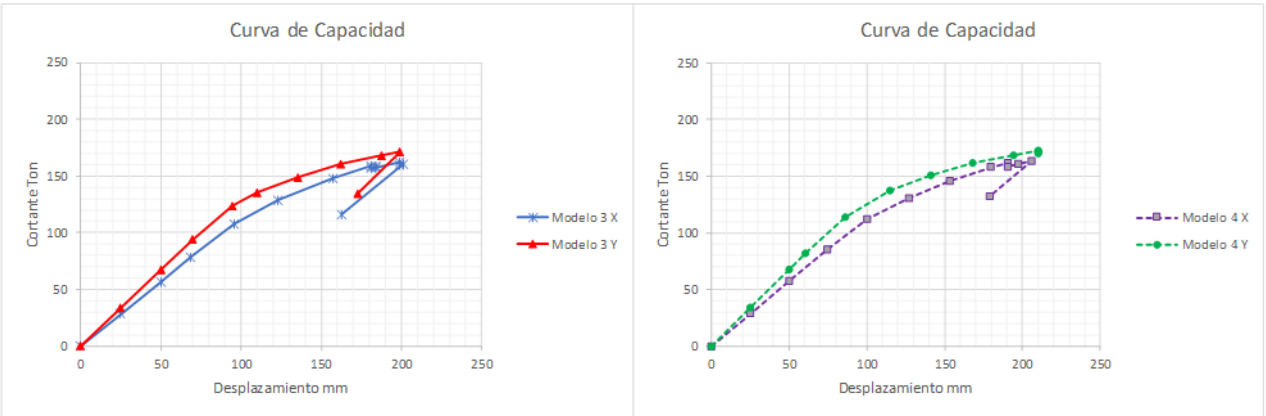


Figura 9. *Curvas de capacidad de los modelos 3 y 4*

A pesar de su fragilidad, esta estructura, en la realidad observada después del sismo de 16 de abril de 2016, presentó daños solo en elementos no estructurales como la mampostería en sus 2 últimos niveles. Una hipótesis que se plantea es el posible hecho de su desplazamiento estuvo restringido por los edificios colindantes, la ausencia de juntas sísmicas aumentaría el daño pero este fenómeno de golpeteo entre estructuras colindantes posiblemente actuaron como una especie de amortiguador restringiendo el desplazamiento y limitando las derivas de la estructura, por esto se simuló una estructura apoyada en sus 3 primeros niveles para tener una aproximación del comportamiento y una explicación del por qué la estructura siguió en pie sin presentar daño en elementos estructurales durante el sismo del 16A.

3.5. Reforzamiento Empleando Vigas De Pandeo Restringido (BRB)

Una vez analizado los 6 modelos y dado que ninguno es óptimo para el nivel de desempeño esperado se propone realizar un reforzamiento empleando Vigas de Pandeo Restringido (BRB). Debido a la similitud de resultados se resumieron los resultados en los que se muestran solo los resultados de los modelos 1 y 2.

En la figura 10 se muestra las curvas de capacidad modelos analizados en lo que se destaca el incremento del desempeño de la estructura aumentando la capacidad de resistencia al contante en un 140%. Adicionalmente se puede observar como la curva de capacidad de la estructura reforzada es muy cercana a la curva de la estructura apoyada lo que nos da una buena idealización de la estructura estuvo restringida al momento del sismo. Otro punto a destacar es la interacción suelo estructura que casi se la puede despreciar en este modelo debido a que son resultados similares a excepción de sus desplazamientos que incrementaron 25%. Un punto en contra seria la incorporación de marcos de acero en los que se desarrolló menor resistencia de la esperada debido a que estos elementos incorporados redujeron la dimensión de los BRB a un 60% por ende no se puede absorber una mayor cantidad de contante.

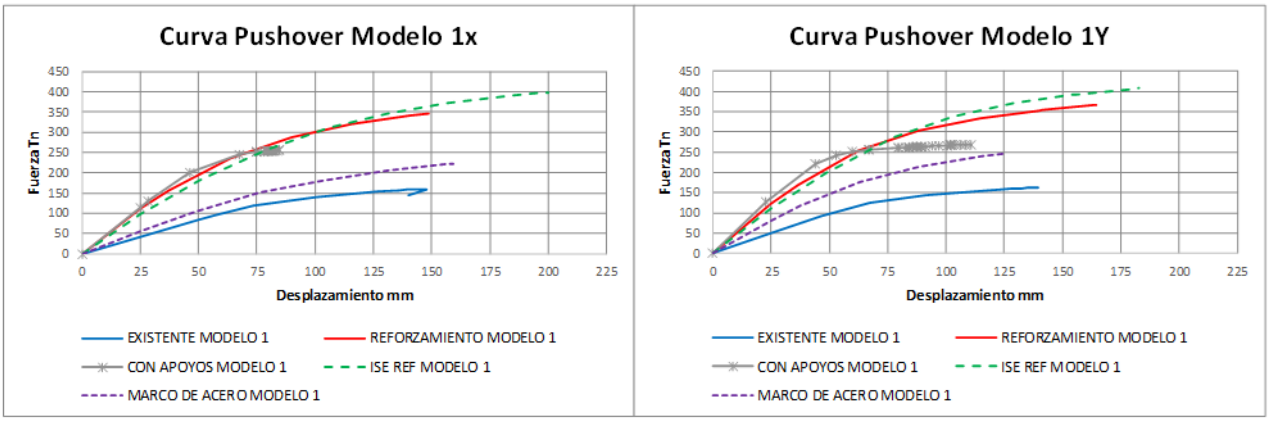


Figura 10. *Comparación de curvas pushover del modelo 1, se observa el comportamiento de la estructura mejorar notablemente al incorporar el reforzamiento con BRB*

La figura 11 muestra el comportamiento del modelo 2 en donde se resalta la resistencia del edificio simulando que tiene restricción los laterales de la estructura simulando el comportamiento de una estructura medianera a la cual no se controlaron las derivas. De los modelos analizados esta es la estructura que mejor comportamiento no lineal tenía en la que se ve reflejado en la resistencia y desplazamientos alcanzadas con un 25% y 35% respectivamente, así mismo la resistencia al cortante del reforzamiento se incrementó a un 100%, de nuevo los efectos de interacción suelo estructura toman poca relevancia en la estructura ya reforzada.

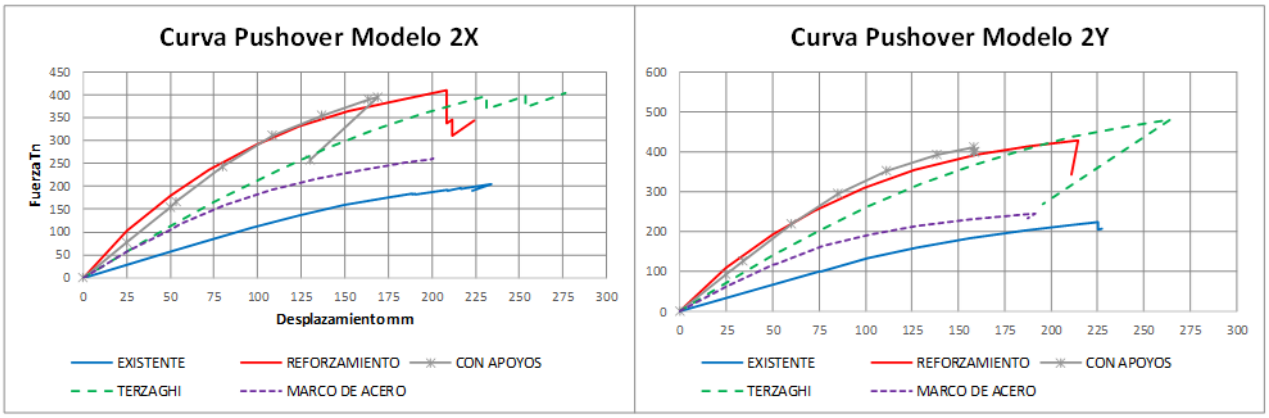


Figura 11. *Comparación de curvas pushover del modelo 2, la resistencia del modelo simulando apoyarse en estructuras vecinas resalta por mayor resistencia*

4. CONCLUSIONES

Para agregar la interacción suelo-estructura al análisis no lineal se conocen varias metodologías, en este trabajo se empleó un modelo usando el método de Terzaghi para calcular el coeficiente de balasto Para este caso se tomó en cuenta una cimentación compuesta de zapatas corridas las cuales transmiten la carga a un suelo arcilloso de baja capacidad debido a que el tipo de suelo y el tipo de cimentación son muy común en la ciudad de Portoviejo, esto nos permitirá mediante coeficientes de autores como Terzaghi para el tipo de suelo anteriormente mencionado hallar el valor de la rigidez K30 o coeficiente de balasto que se representara mediante resortes en el mismo modelo matemático.

En base al análisis visual de las edificaciones afectadas por el sismo del 16 de abril del 2016 y haciendo referencia a las que cuentan con 5 o más pisos la principal falencia que se pudo encontrar es la presencia de pisos blandos donde la edificación presenta una mayor flexibilidad con respecto a los pisos superiores. Adicionalmente se tienen otro tipo de patologías comunes tales como; columna corta, poca hiperasticidad o poca redundancia estructural en donde estas edificaciones solo llegaban a tener 2 pórticos en ambas direcciones ortogonales, estructuras construidas informalmente algunas como el caso de estudio solo estuvieron diseñadas para 2 niveles y se incrementaron el número de pisos.

La evaluación a cada uno de los modelos con sus respectivas cuantías arrojo resultados desfavorables en base al desempeño de la estructura motivo por el que no se alcanzó el comportamiento esperado en una edificación de uso residencial, de tal manera se procedió a reforzar la estructura con vigas de pandeo restringido (BRB) la cual permitió mejorar el desempeño de la misma y se redujeron sus desplazamientos para evitar que la estructura colisione con sus colindantes asegurado la integridad de la misma. Adicionalmente se incorporó la interacción suelo estructura para evaluar la influencia que tiene sobre una estructura reforzada y si esta produce cambios en el comportamiento de la misma, al ver que los efectos no eran significativos se añadió otra alternativa de reforzamiento para el caso de estructuras que no puedan resistir las fuerzas de los BRB obteniendo resultados aceptables en función del desempeño de la estructura y la reducción de las derivas de piso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. G. M. Menéndez-Navarro, J. G. García-García, and A. E. Reyna-García, "Vulnerabilidad sísmica en edificaciones de la ciudad de Portoviejo: Reflexiones del 16-A," *Revista InGenio*, vol. 6, no. 1, pp. 73–86, Jan. 2023, doi: 10.18779/ingenio.v6i1.565.
2. F. Cunalata and P. Caiza, "State of the Art of Seismic Vulnerability Studies in Ecuador," *Revista Politecnica*, vol. 50, no. 1, pp. 55–64, Aug. 2022, doi: 10.33333/rp.vol50n1.06.
3. EPN, "Estudio de la microzonificación sísmica del área urbana de Portoviejo y sus cabeceras parroquiales rurales," Quito, Dec. 2017.
4. S. Alcívar, Y. Mieles, and J. P. Ostaiza, "Estudio comparativo de análisis y diseño de estructuras aporticadas de hormigón armado, aplicando los espectros de la microzonificación sísmica del cantón Portoviejo y los espectros de la NEC-15," *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, vol. 6, no. 1, p. 26, Jul. 2021, doi: 10.33936/riemat.v6i1.3687.
5. R. Aguiar and Y. Mieles, "ANÁLISIS DE LOS EDIFICIOS QUE COLAPSARON EN PORTOVIEJO DURANTE EL TERREMOTO DEL 16 DE ABRIL DE 2016," 2016.
6. A. Vivek and C. H. Hanumantha Rao, "Identification and analysing of risk factors affecting cost of construction projects," *Mater Today Proc*, vol. 60, pp. 1696–1701, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.228.
7. B. Bapir, L. Abrahamczyk, T. Wichtmann, and L. F. Prada-Sarmiento, "Soil-structure interaction: A state-of-the-art review of modeling techniques and studies on seismic response of building structures," *Front Built Environ*, vol. 9, Feb. 2023, doi: 10.3389/fbuil.2023.1120351.
8. I. Fernández Echemendía, A. R. Gómez García, N. del R. Carchipulla Ramón, Y. Bonucci Martín, and M. Á. Pavón Suntaxi, "Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de 97 edificaciones de la 'Comuna Santa Clara de San Millán', Quito," *Eidos*, no. 11, Jun. 2018, doi: 10.29019/eidos.v0i11.417.
9. J. Malavé-Laínez and V. Pinoargote-Rovello, "Análisis de vulnerabilidad sísmica en estructuras de la Parroquia Manglaralto del Cantón Santa Elena, Provincia de Santa Elena," *593 Digital Publisher CEIT*, vol. 8, no. 1–1, pp. 122–143, Feb. 2023, doi: 10.33386/593dp.2023.1-1.1542.
10. Fernández Limes Aldo and Cobelo Cristia Willean D., "INFLUENCIA DE LA INTERACCION SUELO-ESTRUCTURA EN EDIFICACION DE BAJA ALTURA," *Revista Ciencia y Construcción*, vol. 3, no. 3, pp. 34–41, 2022.
11. R. Mata-Lemus, A. Idrees-Rustom, J. Sánchez-Rodríguez, R. Torres-Moreno, E. Nuñez-Castellanos, and G. Bustamante-Laissle, "Assessment of Strength Reduction Factor on Concrete Moment Frames According to the New Venezuelan Seismic Code," *Buildings*, vol. 12, no. 3, Mar. 2022, doi: 10.3390/buildings12030255.
12. J. C. Vielma-Quintero, J. Carvallo, and J. C. Vielma, "Comparative Assessment of Performance-Based Design Methodologies Applied to a R.C. Shear-Wall Building," *Buildings*, vol. 13, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.3390/buildings13061492.
13. E. F. Roldán Pinargote, R. M. Suárez Balcázar, L. J. García Vinces, and M. G. Zevallos Loor, "Análisis estructural del edificio de docentes N° 1 de la Universidad Técnica de Manabí, comparando los espectros sísmicos de la norma ecuatoriana de la construcción NEC 2015, el determinado por el estudio de la microzonificación sísmica de Portoviejo," *Revista de Investigaciones en Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721*, vol. 4, no. 2, p. 21, Jan. 2020, doi: 10.33936/riemat.v4i2.2190.
14. H. Abedini, S. R. Hoseini Vaez, and A. Zarrineghbal, "Optimum design of buckling-restrained braced frames," *Structures*, vol. 25, pp. 99–112, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.istruc.2020.03.004.
15. P. Saingam *et al.*, "Composite behavior in RC buildings retrofitted using buckling-restrained braces with elastic steel frames," *Eng Struct*, vol. 219, Sep. 2020, doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110896.