

Coeficiente Irregularidad en Planta a partir del Análisis de Torsión en Estructuras Irregulares

Medina Christian¹; Medina Santiago¹

¹Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica Ambato, Ecuador

Resumen: En este trabajo se estudian los diferentes tipos de irregularidades en planta que comúnmente se presentan en edificaciones de hormigón armado y su influencia en la torsión accidental. Para ello se plantean modelos estructurales que reflejan configuraciones irregulares y a través de un análisis modal aplicado a cada uno de los modelos, se analizan los efectos de la irregularidad en su comportamiento dinámico. Paralelamente se estudian las diferentes metodologías para considerar la torsión accidental en el diseño sísmico, expuestas en los códigos de construcción de países americanos situados en regiones de alto peligro sísmico como Ecuador, Colombia, Perú, Venezuela, y Estados Unidos, haciendo énfasis en la Norma Ecuatoriana de Construcción 2015; así como metodologías propuestas por investigadores del tema. Finalmente se presenta una ecuación de cálculo de un coeficiente de irregularidad en planta para ser incluido en el diseño sísmico de estructuras el cual se basa en los porcentajes de participación modal de la masa de cada estructura analizada.

Palabras clave: Irregularidad en Planta, Torsión en Planta, Masa Modal

Plan Irregularity Coefficient from the Torsion Analysis of Irregular Structures

Abstract: This paper analyses the different types of plan irregularities that are commonly found in reinforced concrete buildings and its effect in accidental torsion. Therefore, there are proposed linear finite element structural models that reflect these structural configurations, and through a modal analysis it is analyzed the accidental torsion effects in their dynamic behavior. At the same time, there are studied different methodologies to consider the accidental torsion in the seismic design, exposed in the construction provisions of American countries located in high seismic hazard zones, emphasizing the Ecuadorian Standard of Construction 2015; as well as methodologies proposed by researchers of the subject. Finally, it is proposed a plan irregularity coefficient calculation equation to be included in the seismic design, which is based on the modal mass participation ratios of each structure analyzed.

Keywords: Plan Irregularity, Accidental Torsion, Modal Mass

1. INTRODUCCIÓN

Las investigaciones de campo realizadas después de la ocurrencia de sismos devastadores, han confirmado en repetidas ocasiones que las estructuras irregulares son las que mayor cantidad de daño sufren, en comparación con estructuras geoméricamente regulares (Wakchaure, 2012).

Principalmente se ha observado que, en este tipo de estructuras, la causa principal de colapsos se da por el efecto de torsión en planta. La torsión global se refiere al fenómeno de equilibrio mecánico entre las deformaciones estructurales manifestadas como rotaciones de las plantas de la edificación en su plano (horizontal) y las solicitaciones resultantes según el eje vertical, denominadas pares de fuerzas o momentos torsores (Hernandez et al, 2016). La torsión generalmente ocurre cuando existe excentricidad entre el centro de masas del piso y su centro de rigidez. El centro de rigidez es el punto donde al aplicar una fuerza horizontal el sistema estructural

resistente a carga lateral se desplaza sin rotar; puede demostrarse que siempre existe para todo tipo de estructura de un piso y que es también el centro instantáneo de rotación cuando se aplica un torque a la planta (Hernandez et al, 2016). En la Figura 1 se muestra un caso típico de torsión en planta en el que el centro de rigidez no coincide con el centro de masas, por lo que se genera una gran excentricidad.

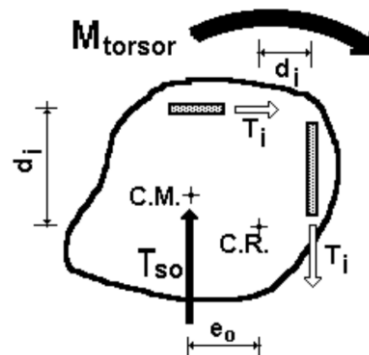


Figura 1. Excentricidad entre el C. Masa y C. Rigidez

Esta excentricidad que se genera involuntariamente respecto del centro de masas, se suele dar por varios factores como la mala distribución en planta de la mampostería de relleno, la carencia de ejes estructurales paralelos, la asimetría estructural, entre otros.

Como consecuencia de ello y conscientes del comportamiento estructural deficiente de estructuras irregulares, los códigos de construcción de países americanos situados en zonas de alta peligrosidad sísmica plantean diferentes metodologías para considerar este efecto en el diseño sismo resistente de edificaciones, ya sea a través de penalización a las estructuras irregulares o mejor aún mediante la prohibición de ciertas irregularidades.

Es así que, de manera general, se analiza el planteamiento de las normas de construcción de Ecuador, Colombia, Perú, Venezuela y Estados Unidos acerca de cómo considerar la torsión accidental en el diseño sismo resistente de estructuras irregulares.

1.1 Norma Ecuatoriana de Construcción NEC-SE-DS (Ecuador)

La norma dicta que, en el caso de estructuras irregulares, tanto en planta como en elevación, se usarán los coeficientes de configuración estructural, que “penalizan al diseño con fines de tomar en cuenta dichas irregularidades, responsables de un comportamiento estructural deficiente ante la ocurrencia de un sismo (Norma Ecuatoriana de Construcción, 2015).

Es así que para el cálculo del coeficiente de irregularidad en planta el análisis se debe realizar para cada tipo de irregularidad para cada piso de la edificación, y aplicarse la ecuación:

$$\phi_p = \phi_{pA} * \phi_{pB} \quad (1)$$

En donde:

ϕ_p = coeficiente de irregularidad en planta, ϕ_{pA}

ϕ_{pA} = mínimo valor de ϕ_{pi} para cada piso i de la estructura en el caso de las irregularidades tipo 1, 2, y/o 3.

ϕ_{pB} = mínimo valor de ϕ_{pi} para cada piso i de la estructura en el caso de las irregularidades tipo 4.

Como se ha mencionado previamente, la norma clasifica a las irregularidades en planta en 4 tipos:

Tipo 1: Irregularidad Torsional

La norma establece textualmente: Existe irregularidad por torsión, cuando la máxima deriva de piso de un extremo de la estructura calculada incluyendo la torsión accidental y medida perpendicularmente a un eje determinado, es mayor que 1,2 veces la deriva promedio de los extremos de la estructura con respecto al mismo eje de referencia (Norma Ecuatoriana de Construcción, NEC-SE-DS Diseño Sismo Resistente, 2015). Es así que se debe asignar un valor de 0.90 al coeficiente de

irregularidad en planta si se cumple con este acápite. No obstante, la penalidad es la misma independientemente de cuantas veces sea mayor la deriva promedio, lo cual no es correcto, pues a mayor diferencia mayor torsión. En la Figura 2 se muestra el tipo de irregularidad descrito, de acuerdo a la NEC 15.

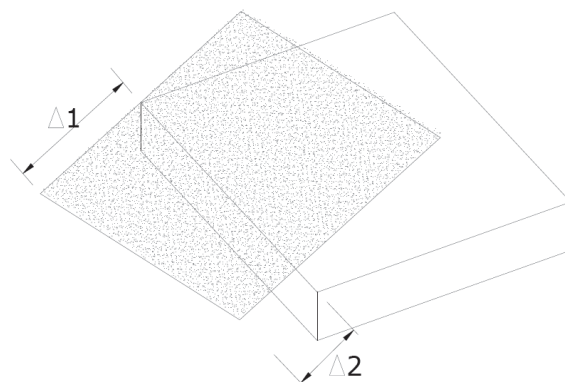


Figura2. Irregularidad en Planta tipo 1

Tipo 2: Retrocesos excesivos en las esquinas

Así mismo, la norma castiga a las estructuras que presentan retrocesos excesivos en las esquinas. Para el efecto se considera un retroceso excesivo cuando las proyecciones de la estructura, a ambos lados del entrante, son mayores que el 15% de la dimensión de la planta de la estructura en la dirección del entrante (Norma Ecuatoriana de Construcción, NEC-SE-DS Diseño Sismo Resistente, 2015) tal y como se observa en la Figura 3. Pero, al igual que en el caso anterior, no se establece un límite en el porcentaje del entrante, pudiendo este llegar a valores tan altos hasta que la forma de la estructura tienda a ser una L; y en este caso el coeficiente sería siempre el mismo 0.90.

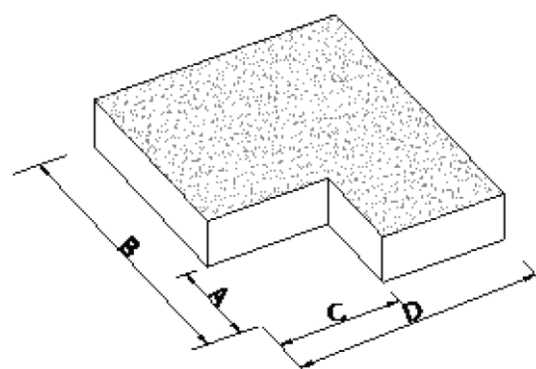


Figura3. Irregularidad en Planta tipo 2

Tipo 3: Discontinuidades en el sistema de piso

Este tipo de irregularidad abarca las estructuras que tienden a presentar formas geométricas tipo H, I, y O. La configuración de la estructura se considera irregular cuando el sistema de piso tiene discontinuidad apreciables o variaciones significativas en su rigidez, incluyendo las causadas por aberturas, entrantes o huecos, con áreas mayores al 50% del área total del piso o con cambios en la rigidez en el plano del sistema de piso demás del 50% entre niveles consecutivos (Norma Ecuatoriana de Construcción, NEC-SE-DS Diseño

Sismo Resistente, 2015). Similar a los casos anteriores, no se establece un límite permisible para el porcentaje de aberturas, entrantes o huecos, debiendo aplicarse la misma penalidad para todos los casos.

La Figura 4 muestra dos estructuras cuya forma geométrica corresponde a una O y una I respectivamente, lo cual es considerado como irregularidad en planta.

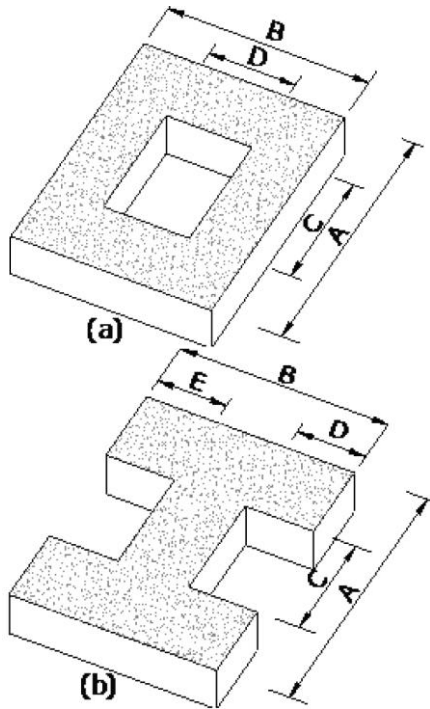


Figura 4. Irregularidad en Planta tipo 3

Tipo 4: Ejes Estructurales no Paralelos

El último caso considera que una estructura es irregular cuando los ejes estructurales no son paralelos o simétricos con respecto a los ejes ortogonales principales de la estructura, como se muestra en la Figura 5. En cuyo caso, el coeficiente de irregularidad asignado es 0.90. (Norma Ecuatoriana de Construcción, NEC-SE-DS Diseño Sismo Resistente, 2015)

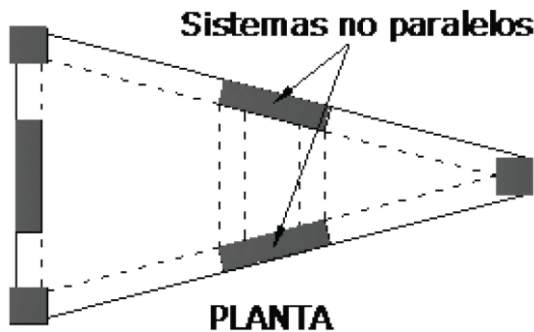


Figura 5. Irregularidad en Planta tipo 4

1.2 Norma Sismo Resistente 2010 NSR-10 (Colombia)

La norma colombiana establece que cuando una estructura se

clasifique como irregular, el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía R que se utilice en el diseño sísmico de la edificación, debe reducirse multiplicándolo por ϕ_p debido a irregularidades en planta, por ϕ_e debido a irregularidades en elevación y ϕ_r debido a ausencia de redundancia. (NSR10, 2010)

De acuerdo con la norma, la edificación se considera irregular en planta cuando ocurre alguno de los casos descritos en la Tabla 1 mostrada a continuación, los cuales son muy similares a los descritos en la norma ecuatoriana.

Tabla 1: Irregularidades en planta

Tipo	Descripción de la irregularidad en planta	ϕ_p
1aP	Irregularidad Torsional	0.9
1bP	Irregularidad Torsional Extrema	0.8
2P	Retrocesos excesivos en las esquinas	0.9
3P	Discontinuidades en el diafragma	0.9
4P	Desplazamiento del plano de acción de elementos verticales	0.8
5P	Sistemas no paralelos	0.9

1.3 Norma Técnica E.030 “Diseño Sismo Resistente” (Perú)

A criterio de la norma peruana, una estructura se puede considerar irregular si se cumple alguno de los casos descritos en la Tabla 2. A cada tipo de irregularidad le corresponde un factor I_p el cual merma al coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas R . El factor I_p se determina como el menor de los valores de la tabla descrita correspondiente a las irregularidades estructurales existentes en altura en las dos direcciones de análisis (E.030, 2016).

Tabla 2: Irregularidades en planta

Irregularidades estructurales en planta	I_p
Irregularidad Torsional	0.75
Irregularidad Torsional Extrema	0.60
Esquinas Entrantes	0.90
Discontinuidades en el diafragma	0.85
Sistemas no paralelos	0.90

A diferencia de las normas de Ecuador y Colombia, la norma peruana sí establece restricciones al no permitirse irregularidades en estructuras esenciales ubicadas en zonas de alta peligrosidad sísmica. Así mismo la penalización de acuerdo al tipo de irregularidad es más severa de acuerdo con esta norma.

1.4 COVENIN 1756-1:2001 Edificaciones Sismo Resistentes (Venezuela)

La norma venezolana plantea que una estructura se considera irregular en planta si se cumple alguno de los siguientes casos descritos en la Tabla 3. Así mismo, establece que en el caso de estructuras irregulares los valores del factor de reducción de respuesta deben ser multiplicados por 0.75 (COVENIN1756-1:2001, 2001).

Tabla 3: Irregularidades en planta

Irregularidades en planta
Gran excentricidad
Riesgo torsional elevado
Sistema no ortogonal
Diafragma flexible
Sistemas no paralelos

1.5 ASCE 7-10 *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures (Estados Unidos)*

El ASCE 7-10 establece que en el caso de tener estructuras irregulares en planta, se realice un incremento en el 25% de las fuerzas de diseño al sistema estructural principal resistente a carga lateral (ASCE 7-10, 2010). Esto resulta igual a aplicar un factor de irregularidad equivalente a 0.8 para todos los casos. Los casos de irregularidad que el código considera son similares a los descritos por las normas analizadas.

Por otro lado, la norma indica que en zonas de alto peligro sísmico la irregularidad torsional extrema es prohibida.

1.6 *Metodología Chopra y De la Llera para considerar torsión accidental*

De la Llera y Chopra plantean una metodología simplificada para estimar los efectos de torsión accidental en el diseño sísmico de edificios, el cual está basado en investigaciones analíticas y probabilísticas del incremento en la respuesta de sistemas de un piso debido a la torsión accidental. Para describir el procedimiento es necesario definir el desplazamiento normalizado del sistema $\tilde{u}_x = u_x^*/u_x$, como la relación entre el desplazamiento del sistema considerando la torsión accidental u_x^* , y el desplazamiento del sistema sin considerar la torsión accidental u_x .

El proceso se centra en el cálculo del desplazamiento normalizado a $x = b/2$ $\tilde{u}_{b/2}$ relacionando las frecuencias fundamentales de los movimientos torsionales y laterales desacoplados del edificio, para después calcular \tilde{u}_x a una distancia x del CM que define la locación de un plano de resistencia interior (de suponer $\tilde{u}_{b/2}$); para finalmente multiplicar las fuerzas laterales determinadas sin considerar la torsión accidental por el factor \tilde{u}_x (Wen-Hsiung, Chopra, & De La Llera, 2001). Esta metodología entonces se centra en el comportamiento estructural dinámico de cada estructura analizada y la penalidad aplicada es específica y única para cada estructura en función de cuán grave es su irregularidad, lo cual es técnicamente correcto.

Sin embargo, el tratamiento que se les da a las estructuras irregulares en planta por parte de las normas de construcción de Ecuador, Colombia, Perú, Venezuela y Estados Unidos es el mismo. En estas normas se penaliza a las configuraciones irregulares mediante el denominado coeficiente de irregularidad en planta, el cual siempre es menor a 1 e induce al incremento de la fuerza sísmica de obligando al diseñador a dotar de mayor resistencia a la estructura.

Es así que la función del coeficiente de irregularidad en planta es evitar o más bien castigar a posibles estructuras torsionales, pero que son clasificadas de acuerdo a su geometría y en la mayoría de los casos previo al análisis de su comportamiento dinámico.

Adicionalmente, a excepción de la norma venezolana y estadounidense, no se establecen límites permisibles para el grado o la gravedad de la irregularidad en análisis, por lo que no se realiza una valoración cuantitativa de la irregularidad sino más bien cualitativa. Es por ello que es necesario, realizar una valoración más aproximada de la “penalidad” necesaria correspondiente a la gravedad de la torsión accidental específica de cada estructura, tal como lo plantean De la Llera y Chopra. Es así que en el presente documento se plantea el cálculo del coeficiente de irregularidad en planta a partir de la forma modal específica de cada estructura analizada.

2. MÉTODO DE ANÁLISIS

Se analizaron los porcentajes de participación modal de la masa de varias configuraciones geométricas que presentan los tipos de irregularidades previamente mencionadas en las normas. La finalidad de este análisis es demostrar que para estructuras que presentan un mismo tipo de irregularidad, su comportamiento puede ser diferente, es así que estructuras aparentemente irregulares, pueden tender a mostrar un comportamiento traslacional antes que torsional.

Una consideración más simplificada para determinar si los efectos de la torsión accidental afectan en el comportamiento sísmico del sistema, parte de relacionar el porcentaje de participación modal de la masa en rotación Rz y el porcentaje de masa predominante en traslación Ux, Uy , evaluado en los dos primeros modos de vibración en los cuales por lo general las fuerzas sísmicas presentan mayor magnitud pues los porcentajes de participación de la masa pueden alcanzar valores cercanos al 80%. De acuerdo a estudios realizados por (Placencia, 2015) los efectos de torsión accidental son de gran incidencia, cuando la relación antes mencionada es mayor al 30%, pues los momentos torsores generados en los elementos del sistema estructural principal resistente a carga lateral pueden inducir a los mismos a fallar de forma frágil, sobre todo en columnas y muros más apartados del centro de torsión. Para el análisis, se utilizaron modelos lineales de elementos finitos que forman configuraciones estructurales con las irregularidades descritas en las normas analizadas.

a. *Estructuras Irregulares en Rigidez*

Esta irregularidad pertenece al primer tipo (irregularidad torsional) el cual contempla estructuras que a primera vista son geoméricamente regulares pero que, debido a la mala disposición de sus elementos estructurales, presentan comportamiento torsional.

En la Figura 6 se muestran las estructuras analizadas, las cuales presentan distintas disposiciones de sus elementos estructurales.

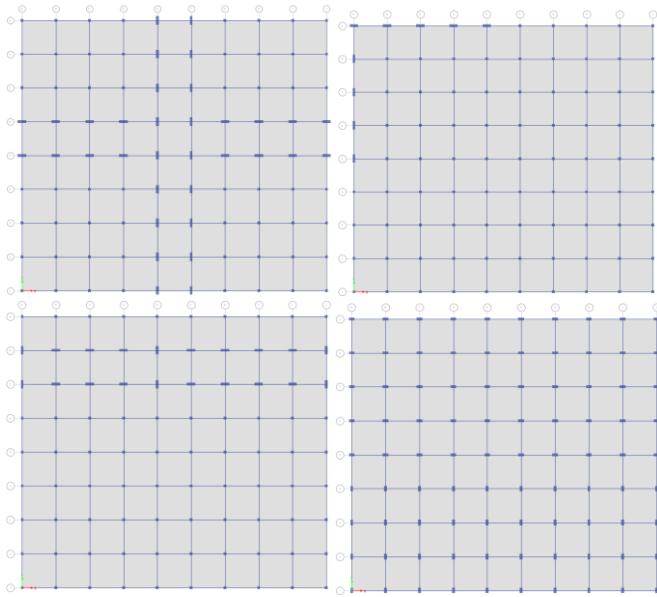


Figura 6. Estructuras Irregulares en Rigidez

Así mismo la Tabla 4 muestra los porcentajes de participación de la masa en sus dos primeros modos de vibración, para los cuatro tipos de modelos analizados: R1, R2, R3, R4.

Tabla 4: Porcentaje de participación modal de la masa Estructuras Irregulares en Rigidez

MODEL	MODO VIBR	UX	UY	RZ	OBSERV
R1	1	3.0	0.0	92.7	Torsional
	2	90.0	0.0	3.0	Traslacional
R2	1	25.9	41.3	14.9	Torsional
	2	46.2	33.0	0.4	Traslacional
R3	1	39.7	14.2	26.0	Torsional
	2	9.1	65.6	5.3	Traslacional
R4	1	52.0	0.0	26.6	Torsional
	2	0.0	77.6	0.0	Traslacional

Los modelos R1-R4 tienen una forma cuadrada en la cual se esperaría una mínima torsión accidental. Sin embargo, en los modelos se ha concentrado la rigidez en distintos puntos de la planta. En el modelo R1 por ejemplo la rigidez se concentra en el centro de la estructura, teniéndose entonces poca rigidez en la periferia. En el modelo R2 la rigidez se concentra en una de las esquinas de la planta. Para el caso de los modelos R3 y R4 la rigidez se concentra en la parte superior de la planta. Los porcentajes de rotación obtenidos para los distintos casos son tan diferentes que en unos casos puede ser que la torsión no sea tan importante como en otros. No obstante, las normas de construcción no hacen diferencia y penalizan a todas las estructuras por igual.

b. Estructuras tipo L

Este tipo de irregularidad pertenece al segundo tipo que las normas analizan (retrocesos excesivos en las esquinas). En este análisis se analizó una estructura de 7 vanos por 7 vanos de 4m entre ejes. Progresivamente se quitó simétricamente un número específico de tableros en el sentido X y en el sentido

Y, de manera que la estructura inicialmente cuadrada, tienda a formarse una L a medida que se quitan los tableros como se muestra en la Figura 7.

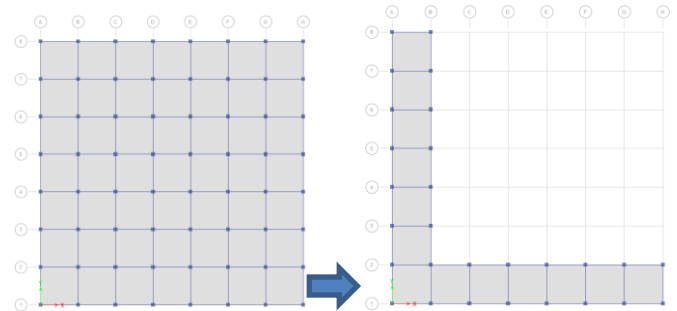


Figura 7. Configuración Estructural tipo L

En la Tabla 5 mostrada a continuación se pueden observar los porcentajes de participación modal de la masa, en traslación y en rotación para las estructuras analizadas.

Tabla 5: Porcentaje de participación modal de la masa Estructuras L

MODEL	% IREG.	MODO VIBR	UX	UY	RZ	OBSERV.
L0	0	1	5.0	77.2	0.0	Traslacional
		2	77.2	5.0	0.0	Traslacional
L1	0.1428a	1	41.1	41.1	0.0	Traslacional
		2	41.1	41.1	0.0	Traslacional
L2	0.2857a	1	41.1	41.1	0.0	Traslacional
		2	41.1	41.1	0.0	Traslacional
L3	0.4285a	1	41.1	41.1	0.0	Traslacional
		2	40.9	40.9	0.3	Traslacional
L4	0.5714a	1	39.6	39.6	2.7	Traslacional
		2	41.0	41.0	0.0	Traslacional
L5	0.7142a	1	32.7	32.7	16.0	Torsional
		2	41.0	41.0	0.0	Traslacional
L6	0.8571a	1	21.0	21.0	38.3	Torsional
		2	40.8	40.8	0.0	Traslacional

Tal como se puede observar las estructuras tienden a cambiar su comportamiento de traslacional a torsional en cualquiera de sus dos primeros modos de vibración, cuando el porcentaje de irregularidad es mayor al 70%, diferente al 15% que fijan las normas. Además, a medida que el porcentaje de torsión aumenta conforme el porcentaje de irregularidad crece, por lo que no es correcto tomar un mismo coeficiente de irregularidad en planta para todos los casos.

c. Estructuras tipo O y 8

Se analizaron las estructuras con aberturas en su sistema de piso, en función de un porcentaje del área total en planta, el cual se incrementó paulatinamente hasta obtener porcentajes mayores al 50% establecido en la norma. Es así que los modelos iniciales O1 y 8-1 presentan un porcentaje bajo de aberturas el cual se va incrementando hasta que en los modelos O3 y 8-3, el porcentaje de aberturas es el máximo. La figura 8 describe los modelos estructurales analizados.

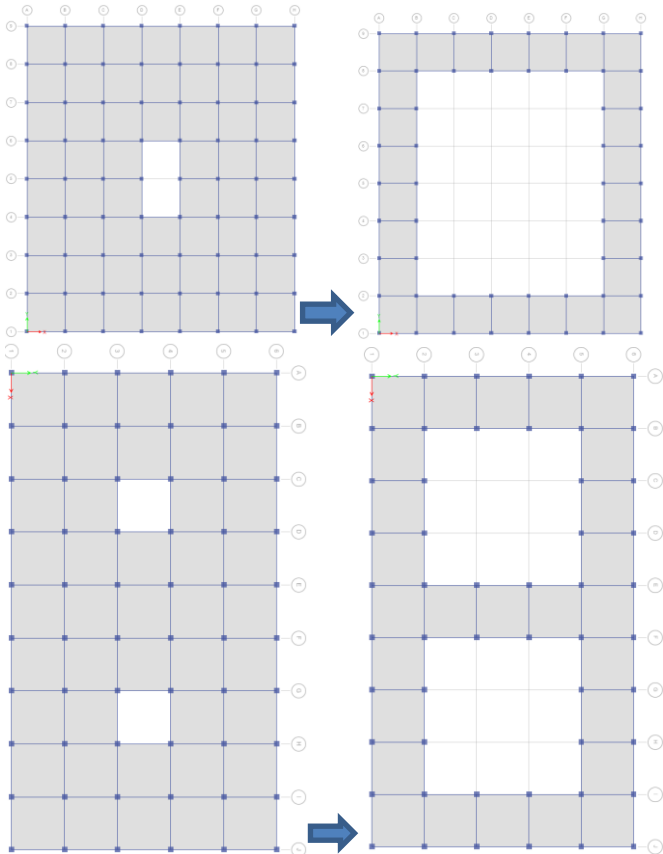


Figura 8. Configuración Estructural tipo O y 8

En la Tabla 6 se muestran los porcentajes de participación modal para las irregularidades tipo O y 8.

Tabla 6: Porcentaje de participación modal de la masa Estructuras O y 8

IRR EG	% IRREG	MODO VIBR	UX	UY	RZ	OBSERV
O1	3.57%	1	43.9	0.0	0.0	Traslacional
		2	0.0	43.9	0.0	Traslacional
O2	21.43%	1	43.7	0.0	0.0	Traslacional
		2	0.0	0.0	37.3	Torsional
O3	53.57%	1	0.0	0.7	34.7	Torsional
		2	39.2	0.0	0.0	Traslacional
8-1	4.44%	1	0.0	41.2	0.0	Traslacional
		2	42.2	0.0	0.0	Traslacional
8-2	22.22%	1	0.0	40.2	0.8	Traslacional
		2	42.5	0.0	0.0	Traslacional
8-3	40.00%	1	38.5	0.0	0.0	Traslacional
		2	0.0	1.6	31.5	Torsional

En ambos casos la torsión en planta tiende a aumentar conforme crece el porcentaje de aberturas en las edificaciones. Al igual que en los casos anteriores el coeficiente de irregularidad en planta es el mismo independientemente de la gravedad de la irregularidad, por lo que esta aseveración no es correcta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

a. Estructuras Irregulares en Rigidez

Se observó que las estructuraciones que a simple vista parecen totalmente regulares y simétricas, pueden llegar a presentar torsión en sus dos primeros modos de vibración por la mala ubicación de los elementos estructurales. Es así que, las columnas rectangulares orientadas de forma arbitraria pueden ocasionar torsión, aún si la sección transversal de todas las columnas es la misma y todos los ejes son ortogonales.

Adicionalmente, se observó que conforme aumenta la altura de la edificación, esta tiende a ser más flexible por lo que la torsión disminuye paulatinamente.

b. Estructuras tipo L

En este tipo de estructuras, la torsión se vuelve importante cuando el centro de rigidez del piso se ubica fuera de la losa, y esta tiende a aumentar conforme aumenta la altura del edificio.

Luego de realizar el análisis se determinó que, al generar una mínima irregularidad simétrica en ambos sentidos, en una estructura igualmente simétrica, el sentido de movimiento de la masa modal cambia de ortogonal a diagonal, teniendo porcentajes de masa modal similares para los dos sentidos de análisis en un mismo modo de vibración.

Paralelamente para el caso de edificios de baja altura, si el grado de irregularidad es diferente en los dos sentidos, el movimiento traslacional de la masa predomina en el sentido más irregular, mientras que en edificios altos el porcentaje de masa que se traslada tiende a ser similar en los dos sentidos por lo que el movimiento es diagonal.

c. Estructuras tipo O y 8

Del análisis de este tipo de irregularidad se desprende que la torsión no es crítica si el porcentaje de aberturas no supera el 50% del área en planta.

Se analizaron también, estructuras con aberturas rodeadas por diafragmas verticales (muros), y se determinó que en este caso si se presenta torsión en planta pues el centro de rigidez se desplaza hacia los muros, por lo que se deben tomar precauciones al momento de ubicar cajas de ascensores o gradas.

Del mismo modo la disposición radial de elementos rígidos que pueden ser: columnas, muros de hormigón o mampostería, dota de gran rigidez traslacional a las estructuras, por lo tanto, la rigidez torsional se ve disminuida generándose gran torsión en planta.

En conclusión, la torsión en planta afecta de distinto modo a las estructuras y no solamente depende de su configuración geométrica sino más bien de sus características dinámicas intrínsecas, por lo que la penalidad que debe aplicarse debe ser única para cada estructura.

3.1 Propuesta para el coeficiente de irregularidad en planta

Una vez que se han analizado las disposiciones de las Normas de países sudamericanos situados en zonas de alto peligro sísmico, y los tipos de irregularidades en planta a través de modelos estructurales basados en elementos finitos lineales, se ha llegado a la conclusión que el factor de irregularidad en planta puede ser determinado con la ecuación:

$$\phi_p = 1.05 - \frac{Rz_i}{\sqrt{Ux_i^2 + Uy_i^2}} \leq 1 \quad (2)$$

Si $\phi_p < 0.75$ Rediseñar Estructura (3)

En donde ϕ_p es el coeficiente de irregularidad en planta, Rz_i es el porcentaje de participación modal de la masa en torsión evaluada en el modo de vibración i . Ux_i es el porcentaje de participación modal de la masa en traslación en el sentido X evaluada en el modo de vibración i , y Uy_i es el porcentaje de participación modal de la masa en traslación en el sentido Y evaluada en el modo de vibración i .

Esta ecuación debe ser evaluada en los dos primeros modos de vibración y deberá utilizarse el menor valor obtenido para dichos modos. Mediante esta ecuación, se permite al diseñador un 5% de torsión en planta sin castigo alguno, y limita el porcentaje máximo de torsión relativa al 30% pero tomando en cuenta un severo castigo. Es así que si producto de la aplicación de la fórmula el coeficiente de irregularidad en planta es menor a 0.75 ($\phi_p < 0.75$) la estructura debe ser reconfigurada de manera que se obtengan porcentajes de torsión relativa menores al 30%. Por supuesto, este coeficiente siempre debe ser menor a la unidad. Adicionalmente, como denominador se considera la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los porcentajes en traslación, a fin de tomar en cuenta la no ortogonalidad de la traslación como en el caso de los modelos estructurales tipo L.

Esta metodología de cálculo de la penalidad por torsión accidental presenta una ventaja sobre la metodología descrita en las normas, en razón de que se considera el comportamiento dinámico de la estructura en base al análisis de sus porcentajes de participación modal másica, y no únicamente en base a su geometría. Es así que la penalidad es única para cada estructura y depende de la gravedad de su irregularidad.

3.2 Aplicación de la Propuesta a las configuraciones analizadas

Se utilizó la ecuación planteada para determinar el coeficiente en algunas de las estructuras analizadas, de manera que se establezca una comparación con los propuestos por las diferentes normas.

En los casos en los que el coeficiente de irregularidad está fuera del rango $0.75 \leq \phi_p \leq 1$, se indica que la estructura debe ser reconfigurada pues el porcentaje de torsión relativa excede el 30%. La Tabla 7 muestra los porcentajes de participación de la masa para los dos primeros modos de vibración, así como la comparación entre los coeficientes de irregularidad en planta asignados de acuerdo con las normas consideradas, y el coeficiente obtenido con la ecuación propuesta en este documento.

Tabla 7: Cálculo del Coeficiente de Irregularidad en Planta

IRREGUL	MODO	UX	UY	RZ	RZ/U	ϕ_p NEC15	ϕ_p NSR10	Ip E 0.30	COVENIN	ASCE 7-10	ϕ_p Propuesta	CONC.
R2	1	25.9	41.3	14.9	36%	0.90	0.90	0.75	0.75	0.80	0.74	REDISEÑAR
	2	46.2	33.0	0.4	1%						1.00	
R3	1	39.7	14.2	26.0	65%	0.90	0.90	0.75	0.75	0.80	0.43	REDISEÑAR
	2	9.1	65.6	5.3	8%						0.97	
L3	1	41.1	41.1	0.0	0%	0.90	0.90	0.90	0.75	0.80	1.00	1.00
	2	40.9	40.9	0.3	1%						1.00	1.00
L4	1	39.6	39.6	2.7	7%	0.90	0.90	0.90	0.75	0.80	1.00	1.00
	2	41.0	41.0	0.0	0%						1.00	1.00
L5	1	32.7	32.7	16.0	49%	0.90	0.90	0.90	0.75	0.80	0.70	REDISEÑAR
	2	41.0	41.0	0.0	0%						1.00	1.00
O1	1	43.9	0.0	0.0	0%	1.00	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	1.00
	2	0.0	43.9	0.0	0%						1.00	1.00
O2	1	43.7	0.0	0.0	0%	1.00	1.00	1.00	0.75	1.00	1.00	REDISEÑAR
	2	0.0	0.0	37.3	100						36.2	36.2
1	1	36.8	34.9	8.2	22%	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.89
	2	78.4	0.0	3.1	4%						1.0	1.0
2	1	21.9	50.6	9.0	18%	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.89	0.89
	2	68.4	10.1	20.1	29%						0.76	0.76

Para el primer caso de irregularidad (R2, R3) todas las normas establecen un coeficiente de irregularidad que esta entre 0.75 y 0.90. Sin embargo, al aplicar la ecuación propuesta, la conclusión final es que las estructuras deben ser rediseñadas para tener menores porcentajes de torsión.

Para el segundo tipo de irregularidades (L3-L5) las normativas establecen coeficientes entre 0.75 a 0.90; pero al aplicar la ecuación se aprecia que para los dos primeros modelos L3 y L4 no se debería aplicar penalidad pues su movimiento es traslacional y que el modelo estructural L5 debería ser reestructurado para presentar porcentajes de torsión menores.

En el primer modelo del tercer tipo de irregularidades (O1, O2) la propuesta coincide con lo planteado en la normativa, y es que no se debería aplicar ninguna penalidad. Por otro lado, para el segundo modelo O2 la normativa plantea que no se debe aplicar penalidad pues el porcentaje de aberturas no supera el 50% del área en planta como se observa en la tabla 6. Sin embargo, el movimiento de la estructura es totalmente torsional en su segundo modo de vibración por lo que requiere ser rediseñada, lo cual se refleja en el resultado de la aplicación de la ecuación propuesta.

Finalmente se plantean dos modelos estructurales (1,2) los cuales no presentan ningún tipo de irregularidad descrita por las normas analizadas, por lo cual no debería aplicarse ningún tipo de penalidad. Sin embargo, se observa que estas estructuras presentan porcentajes de torsión relativamente bajos pero que requieren ser penalizados.

4. CONCLUSIONES

La torsión en planta en las estructuras es provocada cuando el centro de rigidez no coincide con el centro de masas del piso. Esta resulta en el comportamiento deficiente de las estructuras, y alta probabilidad de colapso durante sismos.

Las normativas de construcción de países americanos penalizan a las estructuras cuya configuración geométrica no es regular, mediante la inclusión de un coeficiente menor a la unidad, en el cálculo del cortante basal. El mencionado coeficiente incrementa la fuerza sísmica obligando al diseñador a dotar de mayor resistencia a la estructura en análisis.

Las normas no establecen un límite máximo del grado de la irregularidad por lo que se penaliza de igual manera a todas las estructuras. Además, la penalidad se aplica en función de la geometría de la estructura.

La torsión en planta es importante cuando la relación entre el porcentaje de participación de la masa en rotación y la masa en traslación predominante, es mayor al 30%.

En el análisis de las estructuras se demostró que estructuras similares con un mismo tipo de irregularidad pueden presentar un comportamiento dinámico distinto. Adicionalmente, estructuras que aparentemente son regulares en su geometría, pueden presentar comportamiento dinámico deficiente por la disposición de sus elementos estructurales.

La simetría de los elementos estructurales y la rigidez periférica del piso para evitar el efecto de torsión en planta.

La metodología propuesta por De la Llera y Chopra se centra en el comportamiento estructural dinámico de cada estructura analizada y la penalidad aplicada es específica y única para cada estructura en función de cuán grave es su irregularidad, lo cual es técnicamente correcto.

La ecuación que se propone para el coeficiente de irregularidad en planta, considera las características dinámicas de la estructura a través de los porcentajes de participación modal de la masa en sus dos primeros modos de vibración. Por lo que al aplicar la ecuación se puede diferenciar las estructuras que no requieren penalidad $\phi_p = 1$, las que requieren penalidad severa (Modelo 2 $\phi_p = 0.76$), y aquellas cuya torsión debe ser corregida mediante una reestructuración (Rediseñar), lo cual las normativas de construcción no consideran.

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente documento desean expresar su profundo agradecimiento al M. Sc. Ing. Patricio Placencia

docente investigador de la Escuela Politécnica Nacional por haber aportado con su vasto conocimiento y experiencia durante el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- Aguiar, R. (2003). *Análisis Sísmico por Desempeño*. Quito: Centro de Investigaciones Científicas ESPE.
- Aguiar, R. (2011). El Mega Sismo de Chile de 2010. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 1-38.
- ASCE 7-10. (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and other Structures*. Reston, Virginia: Structural Engineering Institute.
- COVENIN1756-1:2001. (2001). *Edificaciones Sismo Resistentes*. Caracas: Ministerio de Infraestructura.
- De La Llera, J., & Chopra, A. (1994). Accidental and natural torsion in earthquake response and design of buildings. *Earthquake Engineering Research Center*, University of California at Berkeley.
- E.030. (2016). *Norma Técnica E.030: "Diseño Sismo Resistente"*. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Gómez, O., & Maldonado, E. (2005). *Estudio Analítico de los efectos de la torsión natural en el comportamiento de edificios de varios pisos torsionalmente desbalanceados ante solicitaciones sísmicas*. Barranquilla.
- Hernandez et al. (2016). Investigación de respuestas sísmicas críticas incorporando la torsión accidental. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 448-486.
- Hernández, J., & López, Ó. (1999). Response of one way asymmetric plans. *Revista Técnica de Ingeniería*, 157-167.
- Housner, G., & Hannu, O. (1958). The effect of torsional oscillations on earthquake stresses. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 221-229.
- López, O., Raven, E., & Annicchiarico, W. (1993). Efecto de la forma de la planta en el comportamiento sísmico de edificios. *Memorias : 8 seminario latinoamericano de ingeniería sismo resistente y primeras jornadas andinas de ingeniería estructural* (págs. 100-110). Mérida: Departamento de Estructuras. Universidad de los Andes.
- Medina, C. (2016). *Reducción de la vulnerabilidad en estructuras esenciales y especiales de hormigón armado en zonas de alto peligro sísmico en el Ecuador*. Quito: Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental. Escuela Politécnica Nacional.

Norma Ecuatoriana de Construcción. (2015). *NEC-SE-DS Diseño Sismo Resistente*. Quito: MIDUVI.

NSR10. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente Título A*. Bogotá D.C.: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Özmen, G., Girgin, K., & Durgun, Y. (2014). Torsion Irregularity in Multi-Story Structures. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 121-131.

Placencia, P. (2015). *Apuntes de la Materia de Estructuración Sísmica*. Quito: Maestría en Estructuras EPN.

Takeda, Sozen, & Nielsen. (1970). *Reinforced concrete response to simulated earthquakes*. ASCE V96.

Wakchaure, M. (2012). Study of Plan Irregularity On High-Rise Structures. *International Journal of Innovative Research & Development*, 269-281.

Wen-Hsiung, L., Chopra, A., & De La Llera, J. (2001). Accidental torsion in buildings: analysis versus earthquake motions. *Journal of Structural Engineering*, 475-481.



Christian David Medina Robalino.

Nacido en Ambato Tungurahua, en 1989. Obtuvo el título de Ingeniero Civil en la Universidad Técnica de Ambato. Magíster en Estructuras de la Escuela Politécnica Nacional. Experiencia laboral: - Consultor Estructural en proyectos de edificaciones sismo resistentes, puentes, viaductos y estructuras de almacenaje desde junio 2012 hasta la presente fecha. - Docente ocasional de la Universidad Técnica de Ambato desde mayo 2016 hasta la presente fecha. Publicaciones y Líneas de investigación: Ingeniería Estructural, Ingeniería Sísmica, Puentes.



Wilson Santiago Medina Robalino.

Nacido en Ambato Tungurahua en 1976. Ingeniero Civil graduado en la Universidad Técnica de Ambato, Magíster en Estructuras Sismo-Resistentes. Experiencia Laboral: - Constructor y consultor de proyectos estructurales. Docente Ocasional de la Carrera de Ingeniería Civil de la UTA entre octubre del 2002 y octubre del 2009 pasando a ser Docente Titular a tiempo completo partir de esa fecha. Coordinador de la Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato desde octubre del 2012. Líneas de Investigación: Ingeniería Estructural, Diseño de Hormigones, Ensayo de Materiales.