

CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL Y GENERACIÓN GEOMÉTRICA AUTOMÁTICA DE UNA  
ESTRUCTURA DIAGRID

LEIDY YOHANA LEÓN RODRÍGUEZ  
KAREN MARGARITA MORENO MORALES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2014

CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL Y GENERACIÓN GEOMÉTRICA AUTOMÁTICA DE UNA  
ESTRUCTURA DIAGRID

LEIDY YOHANA LEÓN RODRÍGUEZ  
KAREN MARGARITA MORENO MORALES

Trabajo de Grado para optar el título de  
Ingeniera civil

Codirector  
LEONARDO MORENO DE LUCA  
INGENIERO CIVIL, M.SC. & ARQUITECTO

Director  
OSCAR JAVIER BEGAMBRE CARRILLO  
Ingeniero Civil, M.Sc., Phd.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2014

## *DEDICATORIA*

*A DIOS que siempre ha estado a mi lado siendo mi fortaleza, guía y ayuda, sin ÉL esto hubiese sido imposible.*

*A mi madre por su constante amor, apoyo y comprensión.*

*A Sergio Andrés, mi amado novio por su amor, consejos, paciencia y compañía.*

*A todos mis familiares y amigos(as) que celebran junto a mí este logro.*

*Leidy Yohana León Rodríguez*

## **DEDICATORIA**

*A DIOS, por ser ese ser superior especial con infinita bondad y amor, que me brinda paz, tranquilidad y día a día me enseñó con todos los retos que se me presentaron, que el camino al éxito requiere de mucho trabajo y dedicación, además me permitió desenvolverse como madre, hija y ahora profesional.*

*A mi hijo Tomás Ferrer Moreno, porque desde hace 6 años que llegaste a mi vida fuiste mi luz y el motor de mi vida para emprender juntos esta etapa académica, porque con su amor y su paciencia, me recuerda día a día que tengo una responsabilidad más, gracias por ser mi hijo pero más que nada gracias por enseñarme a ser madre.*

*A mis padres, (Gustavo Moreno y Elsi Margarita Morales), que gracias al apoyo, los valores que me enseñaron a ser mejor persona y con su ayuda logré culminar una etapa más de crecimiento personal y profesional en mi vida.*

*A mis hermanas y hermano que durante esta etapa de mi vida estuvieron siempre aconsejándome y acompañándome siendo mis más fieles amigos, gracias por la confianza que siempre nos hemos tenido ¡Gracias!.*

*A Nicolás Andrés Bayona Cesarino, mi compañero, amigo, y novio por su paciencia, amor, comprensión, y el apoyo que me brindó para culminar mi carrera profesional.*

*A mis amigos(as) porque estuvieron de una manera muy significativa guiándome y compartiendo mutuamente toda su amistad durante nuestra vida universitaria.*

*Karen Margarita Moreno Morales*

## *AGRADECIMIENTOS*

*A DIOS.*

*Al profesor Oscar Javier Begambre Carrillo por su labor de liderazgo y dirección.*

*A Leonardo Moreno De Luca por su dedicación, paciencia y apoyo.*

*A nuestros padres que sin ellos hubiese sido muy difícil.*

*A todos nuestros amigos que siempre estuvieron ahí apoyándonos.*

## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>16</b>
<b>1. CONFIGURACIÓN CONCEPTUAL DE UNA ESTRUCTURA DIAGRID .....</b>	<b>18</b>
1.1 CONFIGURACIÓN DEL EXOESQUELETO .....	19
1.2 CONFIGURACIÓN DEL NÚCLEO .....	23
<b>2. PROCEDIMIENTO PARA GENERAR AUTOMÁTICAMENTE LA GEOMETRÍA DE UNA ESTRUCTURA DIAGRID .....</b>	<b>27</b>
<b>3. PREDIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS DE UNA ESTRUCTURA DIAGRID .....</b>	<b>30</b>
3.1 CÁLCULO DEL CORTANTE Y DEL MOMENTO SÍSMICO EN CADA MÓDULO .....	30
3.1.1 Evaluación de cargas .....	30
3.1.2 Cálculo de cargas sísmicas .....	30
3.2 PRE-DIMENSIONAMIENTO DEL ÁREA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS ELEMENTOS DIAGONALES.....	32
<b>4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN .....</b>	<b>36</b>
4.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UNA PLANTA CUADRADA .....	36
4.2 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UNA PLANTA RECTANGULAR .....	40
4.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UNA PLANTA HEXAGONAL .....	43
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>47</b>
<b>CITAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>48</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Sistema Tubular arriostrado Vs. Diagrid. ....	17
<b>Figura 2.</b> Edificios en los cuales se implementa el sistema estructural Diagrid (a) Swiss Re en Londres (b) Hearst Tower en New York (c) Cyclone Tower en Asan (Corea) (d) Capital Gate Tower en Abu Dhabi y (e) Jinling Tower en China.....	17
<b>Figura 3.</b> Composición de una estructura Diagrid. ....	18
<b>Figura 4.</b> Exoesqueleto del edificio Swiss Re, London. ....	18
<b>Figura 5.</b> Núcleo en Acero y vigas perimetrales del edificio Swiss Re. ....	19
<b>Figura 6.</b> Esquemas analíticos para evaluar el ángulo óptimo de los elementos diagonales. ....	20
<b>Figura 7.</b> Función $\sin 2\theta \cos \theta$ para obtener el ángulo óptimo resistente a cortante.....	22
<b>Figura 8.</b> Variación del desplazamiento horizontal en función del ángulo (Estructura de 60 pisos). ....	22
<b>Figura 9.</b> Angulo Vs. Cantidad de pisos basados en los resultados expuestos en [6]. ....	23
<b>Figura 10.</b> Nodo entre la placa soportada en el núcleo, y el exoesqueleto de un sistema Diagrid .....	24
<b>Figura 11.</b> Tipología de planta cuadrada.....	24
<b>Figura 12.</b> Tipología de planta circular.....	25
<b>Figura 13.</b> Núcleo y exoesqueleto para la Hearst Tower. Diseñada por Norman Foster ....	25
<b>Figura 14.</b> Núcleo y exoesqueleto para el Capital Gate. Diseñada por Robert Mathew, Johnson Marshall & Partners (RMJM). ....	26
<b>Figura 15.</b> Construcción exoesqueleto y núcleo para el edificio Capital Gate. Diseñada por Robert Mathew, Johnson Marshall & Partners (RMJM). ....	26
<b>Figura 16.</b> Ejemplo ingreso de puntos de la planta del edificio (a) planta cuadrada (b) planta hexagonal.....	27
<b>Figura 17.</b> Esquema de conectividad. ....	28
<b>Figura 18.</b> Pasos lógicos para la generación automática de la geometría.....	29
<b>Figura 19.</b> Espectro Elástico de aceleraciones de diseño como fracción de g.....	31
<b>Figura 20.</b> Análisis estático de un módulo de una estructura Diagrid.....	33
<b>Figura 21.</b> Planta de la estructura.....	36
<b>Figura 22.</b> Geometría generada con la aplicación, utilizando Rhinoceros + Grasshopper + MatLab. ....	37
<b>Figura 23.</b> Geometría importada de Rhinoceros desde SAP2000. ....	37
<b>Figura 24.</b> Planta Rectangular Edificio 60 Pisos. ....	41

**Figura 25.** Geometría generada con la aplicación, utilizando Rhinoceros + Grasshopper + MatLab. .... 41

**Figura 26.** Planta Hexagonal 60 pisos. .... 44

**Figura 27.** Geometría generada con la aplicación, utilizando Rhinoceros + Grasshopper + MatLab. .... 44

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Patrón Repetitivo de Unión.....	28
<b>Tabla 2.</b> Parámetros cálculo de cargas con base en el Título B de la NSR-10 .....	38
<b>Tabla 3.</b> Resumen de Cargas. ....	38
<b>Tabla 4.</b> Parámetros FHE.....	39
<b>Tabla 5.</b> Resultados del Análisis Sísmico.....	39
<b>Tabla 6.</b> Parámetros para el cálculo de las áreas de los elementos del exoesqueleto. ....	39
<b>Tabla 7.</b> Resultados pre dimensionamiento de los elementos diagonales del exoesqueleto para Diagrid de 42 pisos.....	40
<b>Tabla 8.</b> Datos geométricos iniciales .....	40
<b>Tabla 9.</b> Valores de las Cargas de la estructura. ....	42
<b>Tabla 10.</b> Resultados del Análisis Sísmico.....	42
<b>Tabla 11.</b> Parámetros para el cálculo de las áreas de los elementos del exoesqueleto. ....	42
<b>Tabla 12.</b> Resultados pre dimensionamiento de los elementos diagonales del exoesqueleto para Diagrid de 60 pisos.....	43
<b>Tabla 13.</b> Datos geométricos iniciales .....	43
<b>Tabla 14.</b> Valores de las Cargas de la estructura. ....	45
<b>Tabla 15.</b> Resultados del Análisis Sísmico.....	45
<b>Tabla 16.</b> Parámetros para el cálculo de las áreas de los elementos del exoesqueleto. ....	46
<b>Tabla 17.</b> Resultados pre dimensionamiento de los elementos diagonales del exoesqueleto para Diagrid de 60 pisos.....	46

## RESUMEN

**TITULO:** CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL Y GENERACIÓN GEOMÉTRICA AUTOMÁTICA DE UNA ESTRUCTURA DIAGRID\*

**AUTOR(ES):** LEIDY YOHANA LEÓN RODRÍGUEZ\*\*  
KAREN MARGARITA MORENO MORALES\*\*

**PALABRAS CLAVE:** ESTRUCTURA DIAGRID, CONFIGURACIÓN ESTRUCTURAL, GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE GEOMETRÍA, NÚCLEO, EXOESQUELETO

### DESCRIPCIÓN:

El término DIAGRID es el nombre que se le da a un sistema estructural conformado por elementos ensamblados que forman celdas triangulares, comúnmente utilizado en el diseño y construcción de edificaciones en altura. Debido a la falta de información para la configuración de dicho sistema estructural, y a la complejidad de la geometría del mismo, la ejecución de proyectos de obras civiles que se basan en él, ha conllevado a un sin número de desafíos para las grandes firmas de diseño y construcción. En este contexto, el objetivo del presente trabajo de investigación es contribuir al proceso de desarrollo de la configuración geométrica de una estructura DIAGRID, empleando una metodología que sirve como base para el pre-dimensionamiento de los elementos que componen una estructura de este tipo. Para lograr lo anterior, se realizó una definición conceptual de los principales componentes del sistema (exoesqueleto, núcleo y placa) y se desarrolló una aplicación para generar automáticamente la geometría estructural del exoesqueleto, utilizando el software de modelado 3D Rhinoceros (incluyendo el plug-in Grasshopper) y el software de programación MatLab. Finalmente, se realizaron tres ejemplos de aplicación en donde se emplearon los criterios de configuración conceptual y la aplicación propuesta, demostrando su eficiencia en la definición y creación de una estructura DIAGRID.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Ingeniero Civil. Codirector: Leonardo Moreno De Luca, Ingeniero Civil.

## ABSTRACT

**TITLE:** STRUCTURAL CONFIGURATION AND AUTOMATIC GENERATION OF A GEOMETRIC STRUCTURE DIAGRID\*

**AUTHOR(S):** LEIDY YOHANA LEÓN RODRÍGUEZ\*\*  
KAREN MARGARITA MORENO MORALES\*\*

**KEYWORDS:** DIAGRID STRUCTURE, STRUCTURAL CONFIGURATION, AUTOMATIC GENERATION OF GEOMETRY, CORE, EXOSKELETON

### DESCRIPTION:

The term DIAGRID is the name of a structural system conformed by diagonal elements that create a triangular grid once they are assembled; this type of structure is widely used in the design and construction of skyscrapers. Because of the lack of information about the configuration of such system, and also due to the complexity of its geometry, the development of projects based in it has derived various challenges for the design and construction firms. In this sense, the goal of this research work is to contribute to the development process of the geometrical configuration of a DIAGRID structure, using a methodology that helps to the pre-dimensioning of the elements that conform a structure of this type. To reach the above mentioned, a conceptual definition of the principal components of the system was made (exoskeleton, core, and slab), in junction with the development of an application that automatically generates the structural geometry of the exoskeleton; for the application, and the software used was Rhinoceros, Grasshopper and MatLab. Finally in this work degree, three application examples were made, where the conceptual configuration and the geometrical application criteria were used, showing their efficiency in the definition and creation of a DIAGRID structure.

---

\* Work Degree

\*\* Industrial University of Santander. Faculty of Engineerings Physicist –Mechanics. School of Civil Engineering. Director: Oscar Javier Begambre Carrillo, Civil Engineer. Codirector: Leonardo Moreno De Luca, Civil Engineer.

## INTRODUCCIÓN

En Colombia, factores como el crecimiento demográfico, el incremento en el precio de los terrenos, la escasez de los mismos, y el crecimiento económico, entre otros, han ocasionado un auge en el diseño y construcción de edificaciones en altura. Proyectos en desarrollo como el edificio Majestic [1] (Bucaramanga, 42 pisos) y el edificio BD Bacatá [2] (Bogotá, 66 pisos) son un claro ejemplo de esto.

Por este motivo, se hace necesaria la implementación de sistemas estructurales eficientes, que le otorguen viabilidad técnica, constructiva y económica a este tipo de proyectos. Especialmente, la viabilidad técnica es de gran importancia debido a que al aumentar la altura de la edificación, el sistema estructural encargado de resistir las fuerzas laterales (sísmicas y/o viento) se hace más importante que aquél que resiste las cargas gravitacionales.

Con el fin de resolver la condición estructural descrita anteriormente, en Colombia están reglamentados los siguientes sistemas estructurales: muros de carga, combinado, pórtico y dual. Sin embargo, para edificios de gran altura, se presentan fuertes limitaciones en lo referente a la rigidez lateral y a la relación entre demanda y capacidad [3], de las cuales se derivan estructuras costosas, en ocasiones poco eficientes, y masivas.

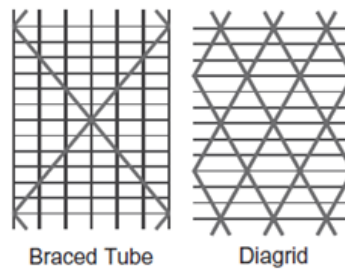
Por lo tanto, en el presente documento se expondrá una tipología (con una metodología para definir su configuración, el pre-dimensionamiento de sus elementos, y un proceso propuesto para generar automáticamente la geometría estructural) que puede llegar a ser más eficiente para edificaciones en altura, y con un potencial estético interesante debido a su configuración geométrica [4]. Este sistema estructural se conoce como DIAGRID (palabra que proviene de *diagonal grid*), el cual se puede considerar como la evolución del sistema tubular arriostrado, ya que consta de elementos diagonales en su perímetro (encargados de resistir la totalidad de las fuerzas laterales) y de un núcleo que resiste únicamente cargas gravitacionales.

La diferencia entre el sistema DIAGRID y el sistema tubular arriostrado convencional radica en que los elementos verticales en el perímetro son eliminados (ver Figura 1), dejando encargados a los elementos diagonales de las solicitaciones laterales y gravitacionales [5] [6]. Algunos ejemplos notorios de esta tipología estructural son Swiss Re en Londres [7], Hearst Tower en New York [7] Cyclone Tower en Asan, Capital Gate Tower en Abu Dhabi [8] y Jinling Tower en China, expuestos en la Figura 2.

Debido a que la implementación del sistema DIAGRID es reciente (en especial en Colombia, en donde no se encontró ningún ejemplo), la literatura existente para llevar a cabo un diseño es mínima. Por esta razón, la intención del presente proyecto de investigación es profundizar en los principios básicos para configurar estructuralmente una edificación de este tipo y, realizar una aplicación que permita generar la geometría de manera automática (debido a la complejidad geométrica que se presenta en estas edificaciones).

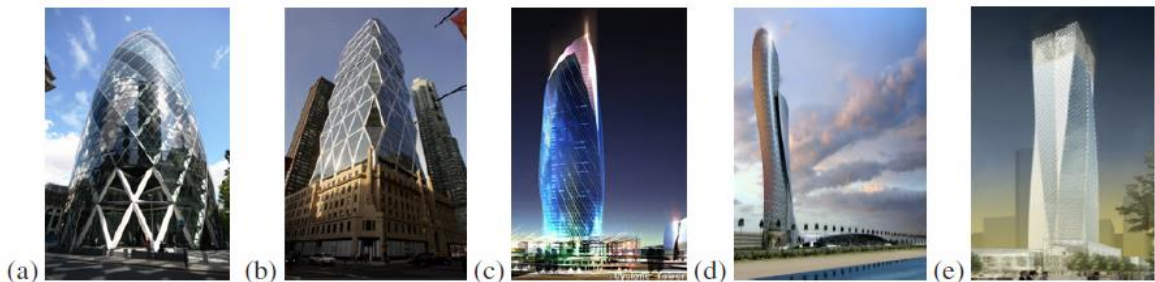
A continuación se plantea una metodología que se desarrolla desde la sección 1 hasta la sección 3, en donde se presenta de manera sucesiva la configuración conceptual de una estructura DIAGRID, del exoesqueleto, y del núcleo. Posteriormente, se expone el procedimiento para generar automáticamente la geometría de una estructura DIAGRID, y una metodología basada en [6] para el pre-dimensionamiento de la sección transversal de los elementos estructurales. Por último, en la sección 4, se presentan tres ejemplos de aplicación.

**Figura 1.** Sistema Tubular arriostrado Vs. Diagrid.



**Fuente:** Moon et al. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design.

**Figura 2.** Edificios en los cuales se implementa el sistema estructural Diagrid (a) Swiss Re en Londres (b) Hearst Tower en New York (c) Cyclone Tower en Asan (Corea) (d) Capital Gate Tower en Abu Dhabi y (e) Jinling Tower en China.

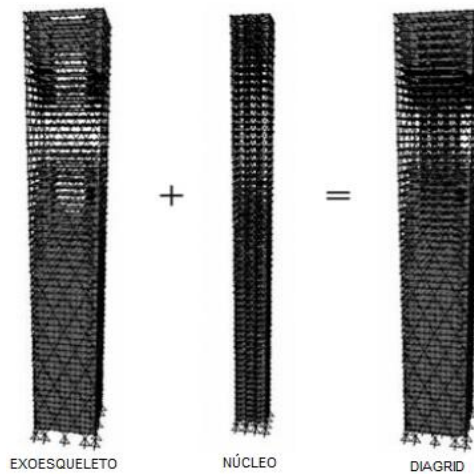


**Fuente:** Jani and Patel. Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings.

## 1. CONFIGURACIÓN CONCEPTUAL DE UNA ESTRUCTURA DIAGRID

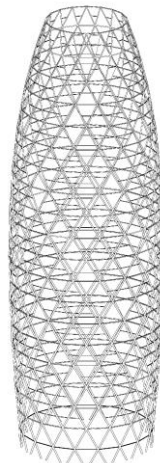
Una estructura DIAGRID se encuentra compuesta por dos partes (ver Figura 3): un exoesqueleto o armazón de acero perimetral (ver Figura 4), el cual soporta las cargas laterales o de sismo, y un núcleo (ver Figura 5) diseñado para resistir únicamente cargas gravitacionales.

**Figura 3.** Composición de una estructura Diagrid.



**Fuente:** Moon et al. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design.

**Figura 4.** Exoesqueleto del edificio Swiss Re, London.



**Fuente:** Munro et al. Swiss Re's Building, London

**Figura 5.** Núcleo en Acero y vigas perimetrales del edificio Swiss Re.



**Fuente:** 30 St Mary Axe - The Gherkin. Available: [http://www.30stmaryaxe.com/photo\\_construction.html](http://www.30stmaryaxe.com/photo_construction.html)

Adicionalmente, es esencial la presencia de vigas perimetrales para asegurar la transmisión de cargas hacia el exoesqueleto (lo cual ayuda a que el núcleo permanezca erguido, y garantiza el comportamiento en conjunto de la estructura, evitando el colapso por volcamiento).

Vale la pena aclarar que la geometría de este tipo de estructuras es personalizada, y está ligada a las necesidades específicas de quien la diseña, por lo tanto antes de realizar el pre- dimensionamiento se deben definir los parámetros básicos de diseño que se presentan a continuación (los cuales se expondrán en detalle posteriormente):

- Geometría de la planta.
- Ángulo de inclinación de los elementos diagonales perimetrales.
- Altura total de la estructura.
- Altura del módulo del sistema DIAGRID (cada módulo puede contener  $n$  pisos de diferente altura).

### 1.1 CONFIGURACIÓN DEL EXOESQUELETO

En el exoesqueleto es necesario tener en cuenta dos parámetros fundamentales: el ángulo de inclinación de las diagonales (el cual tiene un valor óptimo para cada caso, expuesto en párrafos posteriores) y la longitud de sus elementos (de acuerdo a la cantidad de pisos que abarca cada módulo).

Para calcular el ángulo óptimo de los elementos diagonales, se asume que los miembros llevan únicamente cargas axiales por lo que la fuerza cortante en la sección transversal

está relacionada con las fuerzas en los miembros de las diagonales, partiendo del diagrama de cuerpo libre mostrado en la Figura 6, [6]:

$$V = 2F_d \cos\theta \quad (1)$$

$F_d$ : Fuerza axial en la diagonal

$\theta$ : Ángulo de inclinación

Luego, se supone un comportamiento elástico lineal con el fin de relacionar las fuerzas en los elementos con la deformación ( $\varepsilon_d$ ) de los mismos, de la siguiente manera [6] (ver Figura 6):

$$F_d = A_d \sigma_d = A_d E_d \varepsilon_d \quad (2)$$

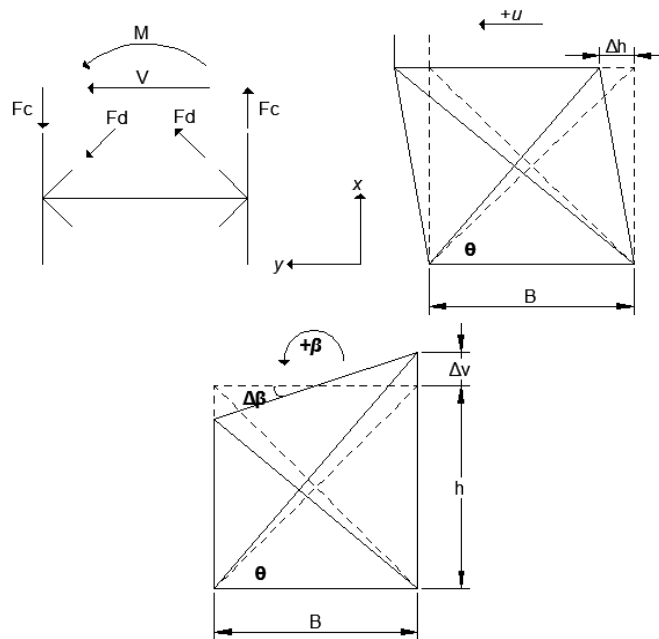
$A_d$ : Área de la sección transversal

$\sigma_d$ : Esfuerzo

$E_d$ : Módulo de elasticidad

$\varepsilon_d$ : Deformación

Figura 6. Esquemas analíticos para evaluar el ángulo óptimo de los elementos diagonales.



Fuente: Moon et al. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design.

Por otro lado, se tiene que

$$\varepsilon_d = \frac{e_d}{L_d}$$

$e_d$ : Deformación total

$L_d$ : Longitud de la diagonal

A partir de los esquemas de la Figura 6 es posible expandir la anterior ecuación de la siguiente manera [6]:

$$\varepsilon_d = \frac{e_d}{L_d} = \frac{\Delta h \cos \theta}{\frac{h}{\sin \theta}} = \frac{\Delta h \cos \theta \sin \theta}{h} \quad (3)$$

Ahora bien, despreciando la deformación longitudinal causada por la rotación, y aproximando la deformación transversal por cortante ( $\gamma$ ) como [6]:

$$\gamma = \frac{\Delta h}{h} \quad (4)$$

Por lo tanto, combinando las ecuaciones (3) y (4) es posible obtener la siguiente aproximación para la deformación por cargas axiales [6]:

$$\varepsilon_d = \gamma \cos \theta \sin \theta = \frac{\gamma \sin 2\theta}{2} \quad (5)$$

Finalmente, combinando las ecuaciones (2) y (5) se obtiene la expresión para la fuerza cortante [6]:

$$V = (A_d E_d \sin 2\theta \cos \theta) \gamma \quad (6)$$

ó,

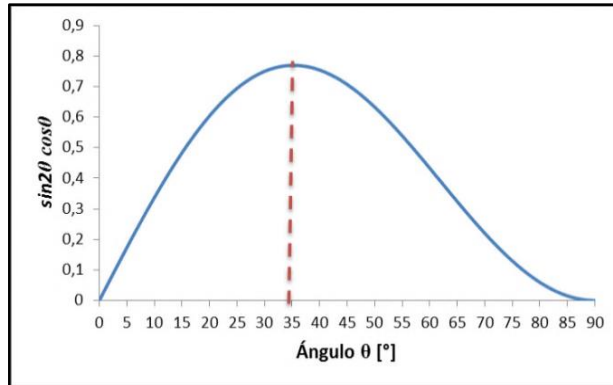
$$V = D_T \gamma$$

Donde:

$$D_T = A_d E_d \sin 2\theta \cos \theta \quad (7)$$

De esta manera, en la Figura 7 es posible observar que el ángulo óptimo para resistir sollicitaciones por cortante es de 35°.

**Figura 7.** Función  $\sin 2\theta \cos \theta$  para obtener el ángulo óptimo resistente a cortante.

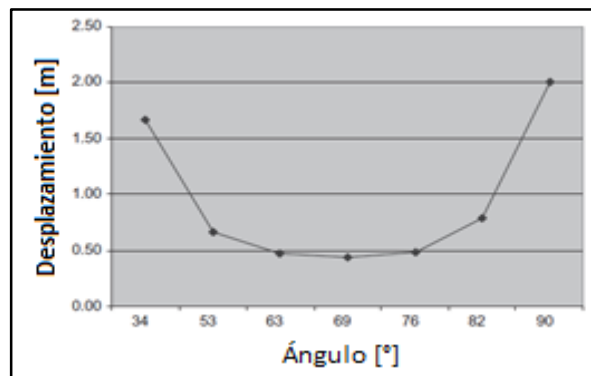


Por otra parte, se sabe que para resistir los momentos de volcamiento (flexión) el ángulo más eficiente es de 90°.

Como resultado, se espera que el ángulo óptimo de los elementos diagonales de las estructuras DIAGRID oscile entre 35° y 90°. En [6] se presenta un estudio en donde se modelaron en el software SAP2000 tres estructuras, de 60, 42 y 20 pisos, con distintos ángulos contenidos en el rango anterior. Para cada uno de los ángulos se evaluó la deriva en el último piso con el fin de encontrar iterativamente el ángulo óptimo (con el que se presentara la menor deriva), obteniéndose los siguientes resultados: para la estructura de 60 pisos, el ángulo óptimo fue 69° (ver Figura 8), mientras que para la de 42 y 20 pisos, el ángulo óptimo fue 63° y 53°, respectivamente.

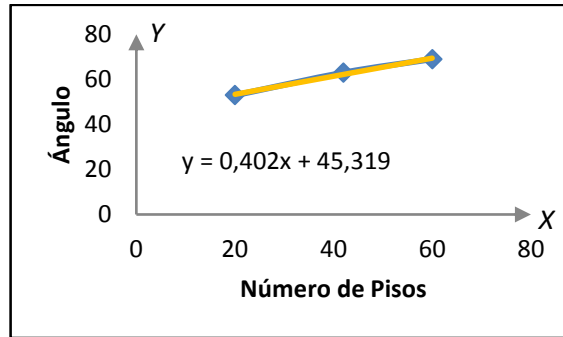
De los resultados anteriores se puede concluir que el ángulo óptimo varía en función de la altura del edificio (ver Figura 9).

**Figura 8.** Variación del desplazamiento horizontal en función del ángulo (Estructura de 60 pisos).



**Fuente:** Moon et al. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design.

**Figura 9.** Angulo Vs. Cantidad de pisos basados en los resultados expuestos en [6].



En los mismos estudios presentados en [6] también se revisó que el desplazamiento en el último piso fuese menor que  $H/500$  (por lo general una restricción de norma sismo-resistente). En este caso, las estructuras de 60 y 42 pisos cumplieron con dicha restricción, mientras la de 20 pisos no. Esto se debe a que las estructuras en altura se tienden a comportar como una viga a flexión cuando el sistema estructural es significativamente rígido (como el sistema DIAGRID), pero cuando su altura disminuye se asemejan a una viga en cortante. Por consiguiente, no es recomendable una estructura DIAGRID para una edificación de poca altura (o sin un determinado nivel de esbeltez); y es por este motivo que surge otro parámetro significativo para el exoesqueleto, y en general para diseñar una estructura DIAGRID, y es la relación de aspecto definida como  $H/B$ ; siendo  $H$  la altura total del edificio y  $B$  el ancho de la planta.

A partir de los resultados expuestos en [6], se comprobó que para una configuración óptima de un sistema DIAGRID, la relación de aspecto  $H/B$  debe ser mayor que 5.

## 1.2 CONFIGURACIÓN DEL NÚCLEO

El núcleo de una estructura DIAGRID debe estar diseñado para soportar únicamente las cargas de gravedad, ya que su contribución a la rigidez lateral oscila entre un 15 y un 20% [6].

En el núcleo se encuentran las pocas columnas que van a quedar en el interior del sistema DIAGRID, soportando parte de la carga de las placas de entrepiso. Generalmente, el entrepiso está conformado por vigas perimetrales sobre las cuales se apoya una lámina colaborante. A su vez, estas vigas están apoyadas en las columnas del núcleo y en los diferentes nodos del exoesqueleto, con el fin de garantizar la respectiva transmisión de cargas entre el núcleo y el sistema DIAGRID (Ver Figura 10).

**Figura 10.** Nodo entre la placa soportada en el núcleo, y el exoesqueleto de un sistema Diagrid



**Fuente:** Munro et al. Swiss Re's Building, London.

El núcleo se puede construir en concreto o en acero, y su área corresponde aproximadamente al 25% del área total de la edificación. En la Figura 11 y 12 se pueden ver dos tipologías distintas de planta, con su respectiva área de núcleo, y con la distribución de las vigas perimetrales.

Figura 11. Tipología de planta cuadrada.

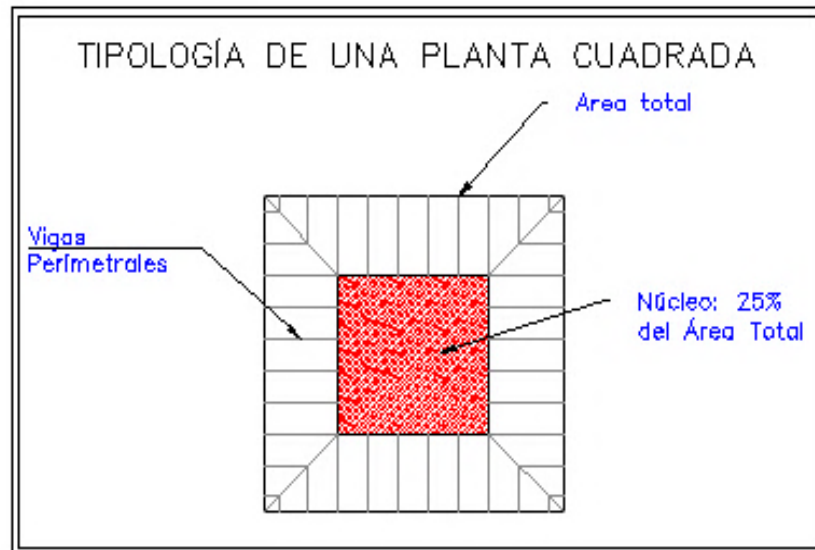
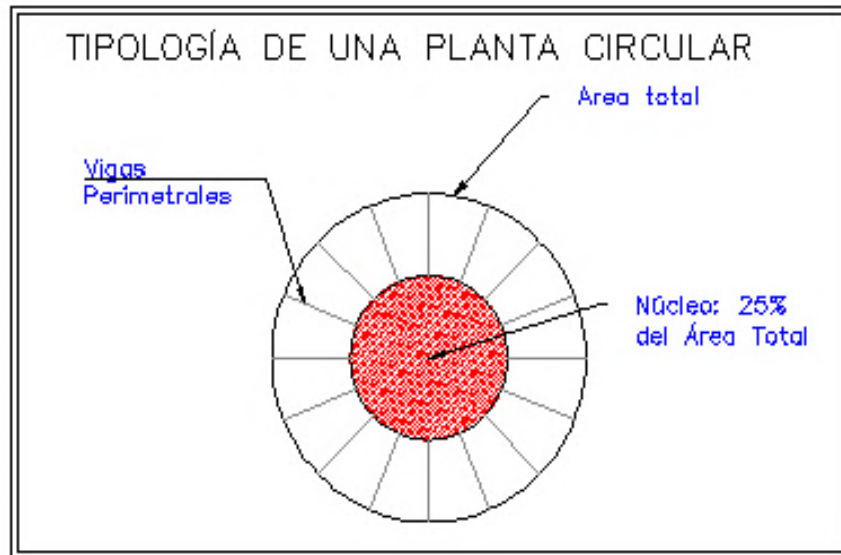
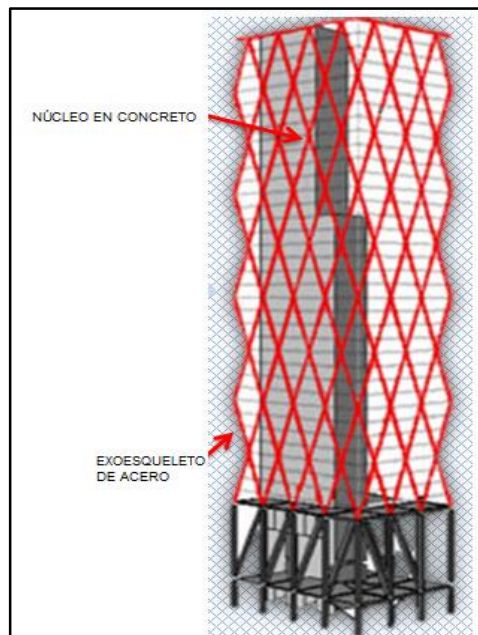


Figura 12. Tipología de planta circular



Con el fin de ampliar un poco más lo referente a la configuración del núcleo, en las Figuras 13, 14 y 15 se exponen casos particulares en donde se aprecia la estructura completa, visualizando tanto el núcleo como el exoesqueleto.

Figura 13. Núcleo y exoesqueleto para la Hearst Tower. Diseñada por Norman Foster



Fuente: Young. Hearst Tower Un diamante high-tech.

**Figura 14.** Núcleo y exoesqueleto para el Capital Gate. Diseñada por Robert Mathew, Johnson Marshall & Partners (RMJM).



**Fuente:** Arias Schickler. El Capital Gate: La Torre Inclinada que Desafía la Gravedad.

**Figura 15.** Construcción exoesqueleto y núcleo para el edificio Capital Gate. Diseñada por Robert Mathew, Johnson Marshall & Partners (RMJM).



**Fuente:** Arias Schickler. El Capital Gate: La Torre Inclinada que Desafía la Gravedad

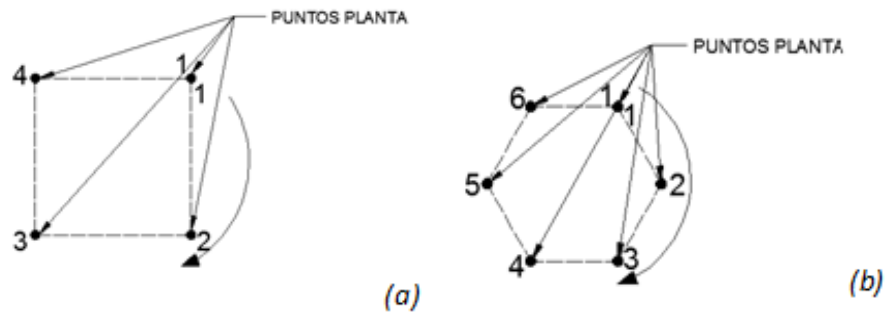
## 2. PROCEDIMIENTO PARA GENERAR AUTOMÁTICAMENTE LA GEOMETRÍA DE UNA ESTRUCTURA DIAGRID

Para la generación automática de la geometría de una estructura DIAGRID, se realizó una programación interactiva en Grasshopper, un plug-in de Rhinoceros, y en MatLab. De esta manera, es posible exportar datos geométricos (como archivos de texto) desde Grasshopper a MatLab, y viceversa.

Como primer paso, el usuario debe definir los siguientes datos de entrada en Grasshopper (con todas las ayudas visuales de Rhinoceros):

Planta Del Edificio: se debe ingresar los puntos que delimitan la planta del edificio, en orden y cerrando el polígono; es decir, se debe partir de un punto y llegar a éste (ver Figura 16).

**Figura 16.** Ejemplo ingreso de puntos de la planta del edificio (a) planta cuadrada (b) planta hexagonal



**Cantidad de pisos:** el número total de pisos que tendrá el edificio.

**Altura del entrepiso:** la altura deseada de entrepiso, de eje a eje de placa.

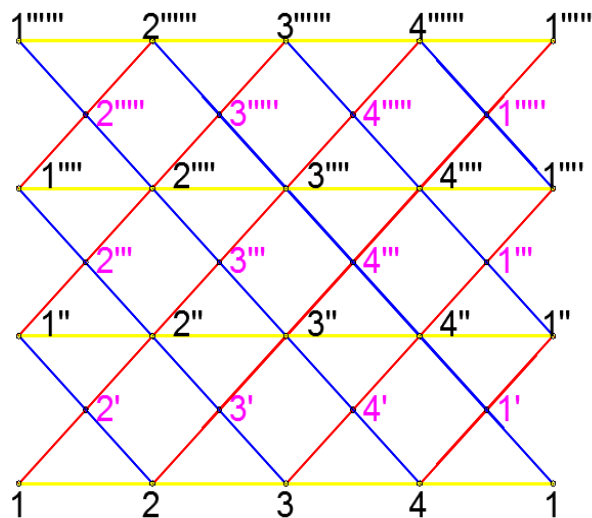
**Cantidad de pisos que abarca el módulo:** indicar cuántos pisos contiene el módulo repetitivo.

**Ángulo de inclinación:** Se debe ingresar el ángulo óptimo para la estructura, como se indicó en la sección 1.

Luego, esta información se extrae de Grasshopper como archivo de texto y se importa desde Matlab. Posteriormente, el código que se desarrolló calcula la longitud de cada cara de la planta, la separación entre puntos (para que se cumpla el ángulo ingresado), el número de espacios en cada cara de la planta, crea un vector donde estén las coordenadas X de todos los puntos, y otro en donde estén las coordenadas Y. Como paso

siguiente, se ejecuta un algoritmo que se creó para unir los puntos mediante líneas, las cuales definirán a los elementos diagonales de la estructura. En la Figura 17 se puede ver un esquema de donde parte el algoritmo para definir la forma como se deben unir los nodos mediante líneas con el fin de obtener la geometría del entramado diagonal, así como en la Tabla 1 se puede ver el patrón repetitivo de unión de puntos que se debe tener para generar las diagonales rojas mostradas en el esquema de la Figura 17.

**Figura 17.** Esquema de conectividad.



**Tabla 1.** Patrón Repetitivo de Unión

1	2'
2	3'
3	4'
4	1'
2'	2''
3'	3''
4'	4''
1'	1''

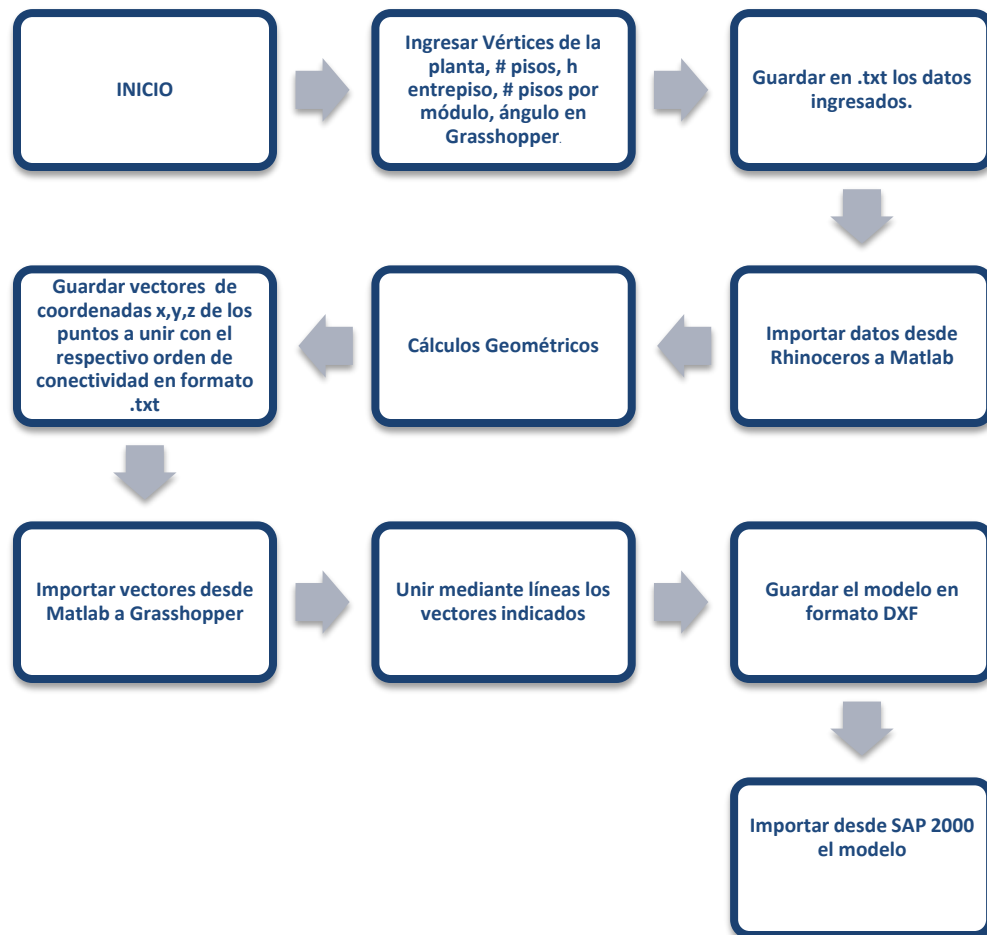
Luego, los vectores con las coordenadas X, Y, y Z de los puntos ordenados (de acuerdo al patrón repetitivo de unión) son guardados como archivo de texto para posteriormente leerlos en Grasshopper. En este sentido, los elementos diagonales dejan de ser datos y

pasan a formar un modelo 3D en Rhinoceros, completando la interacción entre los dos software.

Si el usuario desea continuar con una fase de diseño estructural detallado (posterior a la configuración estructural y al pre-dimensionamiento que se expone en este documento), la geometría obtenida de Rhinoceros se puede guardar en formato .dxf para ser leída desde un software de diseño y análisis estructural como SAP2000, reduciendo así la complejidad de la generación geométrica (propia del sistema DIAGRID).

Para concluir con esta sección, en el esquema de la Figura 18 se puede ver de manera sucesiva los pasos lógicos generales para la generación automática de la geometría. Cabe resaltar que los dos últimos pasos son opcionales, dado que son para llevar la geometría al software de modelamiento estructural si se quiere realizar un análisis y/o diseño de la estructura.

**Figura 18.** Pasos lógicos para la generación automática de la geometría.



### 3. PREDIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS DE UNA ESTRUCTURA DIAGRID

Una vez obtenida la geometría de la estructura con la ayuda de la aplicación propuesta (ver sección 2), en esta sección se procede a realizar un análisis sísmico con el fin de obtener el cortante y el momento para cada uno de los módulos del sistema DIAGRID. A partir de dichas solicitaciones, posteriormente se determinan las áreas de la sección transversal de los elementos que conforman el exoesqueleto.

#### 3.1 CÁLCULO DEL CORTANTE Y DEL MOMENTO SÍSMICO EN CADA MÓDULO

Para estimar de manera preliminar el cortante y el momento de la estructura, se utiliza el método de la Fuerza Horizontal Equivalente con base en el Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10).

##### 3.1.1 Evaluación de cargas

Se procede a estimar las solicitaciones totales del edificio, y las de cada módulo, de manera aproximada, teniendo en cuenta las cargas muertas y vivas de los elementos no estructurales según la NSR-10. De igual forma, también se debe calcular la carga muerta que generan los elementos estructurales, basándose en un área de sección transversal supuesta que permita llevar a cabo los cálculos.

##### 3.1.2 Cálculo de cargas sísmicas

Se debe hallar el cortante sísmico en la base,  $V_S$ , con el fin de distribuirlo en altura (para cada módulo). Dicha solicitación se calcula de la siguiente manera [3]:

$$V_S = S_a g M \quad (8)$$

Donde,

$S_a$ : Fracción de la aceleración, leída del espectro.

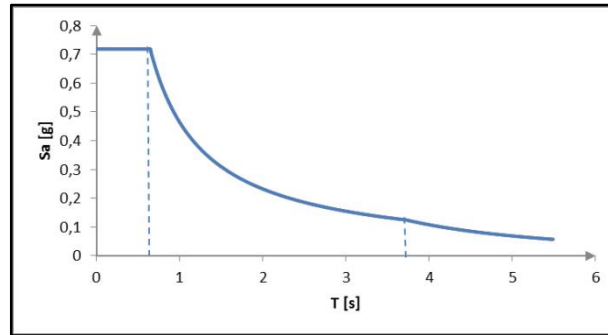
$g$ : Valor de la gravedad.

$M$ : Masa total de la estructura.

Los valores de las regiones del espectro (ver Figura 19) pueden ser hallados mediante las ecuaciones del espectro elástico de aceleraciones como fracción de  $g$ , en la NSR-10, Título

A, Figura A.2.6-1. Asimismo, los parámetros como  $A_a$ ,  $A_v$ ,  $F_a$ ,  $F_v$ ,  $I$ , se pueden obtener de las tablas, A.2.3-2, A.2.4-3, A.2.4-4 y A.2.5-1 respectivamente, en la NSR-10.

**Figura 19.** Espectro Elástico de aceleraciones de diseño como fracción de  $g$



**Fuente:** Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. Reglamento colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.

$T_c, T_L$  : Véase [3] Sección A.2.6

Para obtener el valor de  $S_a$  del espectro se debe conocer el valor del período de la estructura, y éste se puede calcular, de manera aproximada, con la siguiente ecuación [3]:

$$T_a = C_t h^\alpha \quad (9)$$

$C_t$ : Coeficiente utilizado para calcular el período de la estructura. Véase [3] sección A.4.2.2 .

$\alpha$ : Exponente para ser utilizado en el cálculo del período aproximado  $T_a$ . Véase [3] sección A.4.2.2.

Donde  $C_t$  y  $\alpha$  se encuentran en la NSR-10, Título A, Tabla A.4.2-1, con un valor específico para cada sistema estructural. Sin embargo, el sistema estructural DIAGRID no se encuentra contemplado en la NSR-10, por lo tanto se toman los valores del sistema estructural que más se aproxima (de acuerdo a la rigidez y al material de la estructura). En este sentido, el sistema elegido fue el de pórticos arriostrados de acero estructural con diagonales excéntricas restringidas a pandeo.

Posteriormente, se calculan los factores de distribución de cada módulo con la siguiente ecuación [3]:

$$C_{VX} = \frac{m_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n (m_i h_i^k)} \quad (10)$$

Donde:

$C_{vx}$ : Factor de distribución

$m$ : Masa del módulo  $i$

$h$ : Altura acumulada hasta el módulo  $i$

$k$ : Exponente relacionado con el período fundamental  $T$

Teniendo  $C_{vx}$  y  $V_s$  se procede a calcular las fuerzas sísmicas horizontales en cada módulo de la siguiente manera [3]:

$$F_x = C_{vx}V_s \quad (11)$$

Por último, con base en las fuerzas horizontales por módulo se puede calcular el cortante del mismo, el cual se necesitará más adelante para la estimación de las áreas de sección transversal de los elementos.

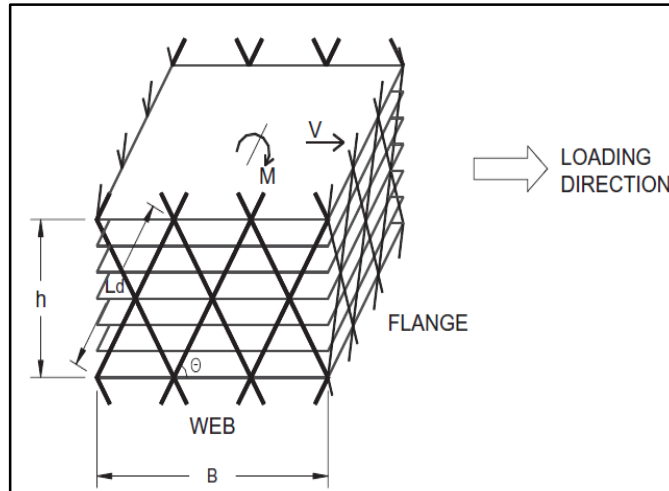
Una vez obtenido el cortante mediante el uso de la FHE, y teniendo en cuenta la altura de su aplicación, se puede determinar el momento sísmico para cada módulo de la estructura.

### 3.2 PRE-DIMENSIONAMIENTO DEL ÁREA DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES DE LOS ELEMENTOS DIAGONALES.

En el presente capítulo se muestra la metodología planteada en [6], basada en la rigidez de los sistemas estructurales de acero (DIAGRID), para edificios en altura. Esta metodología estudia el sistema tubular arriostrado, y a partir de éste deriva las ecuaciones necesarias para el sistema DIAGRID con la diferencia de que en este caso se suprimen todas las columnas verticales.

Para lograr lo anterior, la estructura DIAGRID se modela como una viga vertical en voladizo, empotrada en el suelo; esta se subdivide longitudinalmente en módulos de acuerdo al patrón repetitivo de la DIAGRID, debido a que la geometría de las diagonales abarca cierta cantidad de pisos y que a su vez estarán contenidos en un módulo que se repetirá  $n$  veces según sea la altura del edificio. La Figura 20 indica el caso de un módulo que tiene 6 pisos.

**Figura 20.** Análisis estático de un módulo de una estructura Diagrid.



**Fuente:** Moon et al. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design.

Dependiendo de la dirección de la carga, las caras de la estructura pueden actuar como web, siendo ésta la cara paralela a la dirección de la fuerza lateral, o como flange, que sería la cara perpendicular a la dirección de la fuerza.

El método convencional para hallar el área de la sección transversal es iterar hasta alcanzar la deriva máxima permitida, mientras que con la metodología planteada en [6] se evita el proceso de iteración debido a que este procedimiento inicia con la suposición que el desplazamiento lateral total de la estructura, debido a las deformaciones producidas a flexión (momentos de volcamiento distribuidos por módulo) y a cortante (cortantes sísmicos), será el máximo permitido por la normatividad vigente. De este modo se debe buscar la rigidez de la estructura que permita dicho desplazamiento, y a partir de la rigidez se pueden obtener las áreas de la sección transversal para los elementos.

El desplazamiento lateral total en la parte superior de la estructura está dado por:

$$u(H) = \gamma^* H + \frac{\chi^* H^2}{2} \quad (12)$$

$\gamma^*$ : Deformación por cortante deseada.

$\chi^*$ : Deformación por momento deseada.

Posteriormente se introduce un factor adimensional de diseño “s”, que es la relación entre el desplazamiento de la parte superior de la estructura debido al momento, y el mismo parámetro ocasionado por el cortante.

Los estudios desarrollados en [6] determinaron que el factor de diseño “s” óptimo está dado por:

$$s = \left(\frac{H}{B} - 3\right) \text{ Para } \frac{H}{B} \geq 5 \text{ y } 60^\circ \leq \theta \leq 70^\circ \quad (13)$$

*H: Altura total de la estructura.*

Con la relación de los desplazamientos contralados por la deriva permitida se puede obtener los valores para las deformaciones por cortante y momento como se indica en las siguientes ecuaciones:

$$\gamma^* = \frac{1}{(1+s)\alpha^*} \quad (14)$$

$$\chi^* = \frac{2s}{H(1+s)\alpha^*} \quad (15)$$

$\alpha^*$ : Es el valor sobre el cual se divide la altura de la estructura para definir la deriva máxima permitida (Según normatividad colombiana (NSR-10),  $\alpha^* = 100$ ).

Siguiendo la metodología desarrollada en [6] los tamaños de los miembros para las caras (*web* y *flange*) de los módulos de la estructura se pueden calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$A_{d,w} = \frac{VL_d}{2N_w E_d h \gamma^* \cos^2 \theta} \quad (16)$$

$$A_{d,f} = \frac{2ML_d}{N_f B^2 E_d \chi^* h \sin^2 \theta} \quad (17)$$

Dónde:

$A_{d,w}$ : Área de cada diagonal por cortante.

$A_{d,f}$ : Área de cada diagonal por momento.

*V: Fuerza cortante.*

*M: Momento.*

*L<sub>d</sub>: Longitud de la Diagonal.*

*E<sub>a</sub>: Módulo de elasticidad del acero.*

*θ: Ángulo de la Diagonal*

*γ\*: Deformación por cortante*

*χ\*: Deformación por flexión*

*N<sub>w</sub>: Número de diagonales sometidas al plano web.*

*N<sub>f</sub>: Número de diagonales sometidas al plano flange.*

*B: Ancho o base del edificio, en la dirección de la fuerza aplicada.*

Una vez calculadas las dos áreas, se debe escoger la de mayor tamaño.

## 4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

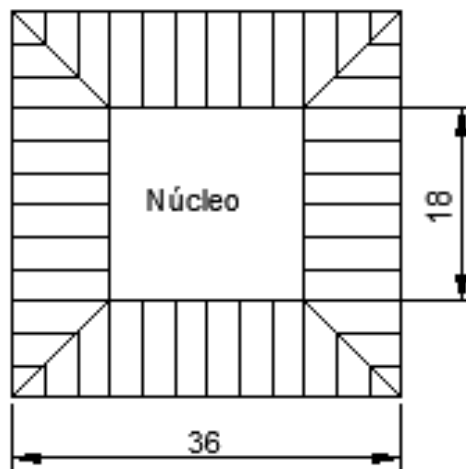
A continuación se mostrarán tres ejemplos donde se aplica la metodología planteada en las secciones 1, 2 y 3, con el objetivo de obtener no solo la geometría en cada ejemplo, sino además la configuración estructural para cada Diagrid. En el primer ejemplo se explicará el procedimiento de manera detallada y en los siguientes ejemplos solo se presentarán los resultados.

### 4.1 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UNA PLANTA CUADRADA

#### Paso 1: Definición de parámetros geométricos

La estructura que se estudia a continuación tiene una planta cuadrada de  $36m \times 36m$ , configurada como se muestra en la Figura 21; consta de 42 pisos, los cuales tienen una altura de 4 m; el ángulo de inclinación de las diagonales del exoesqueleto es de  $63^\circ$ , el cual se considera el óptimo para una estructura de 42 pisos (como se mencionó en la sección 1.1.). El área en planta que ocupa el núcleo de la estructura es el 25% del área total de la edificación. La separación entre vigas perimetrales es de 3m. El módulo repetitivo está conformado por 6 pisos, por lo tanto serán 7 módulos para la altura total.

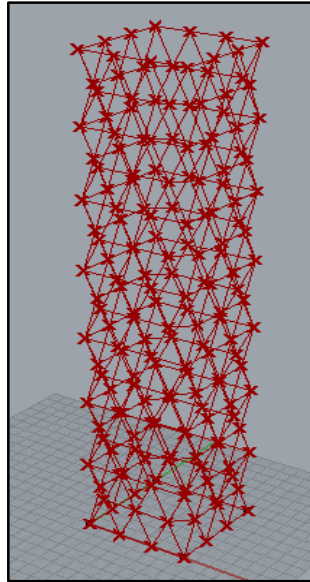
Figura 21. Planta de la estructura.



#### Paso 2: Generación automática de la geometría

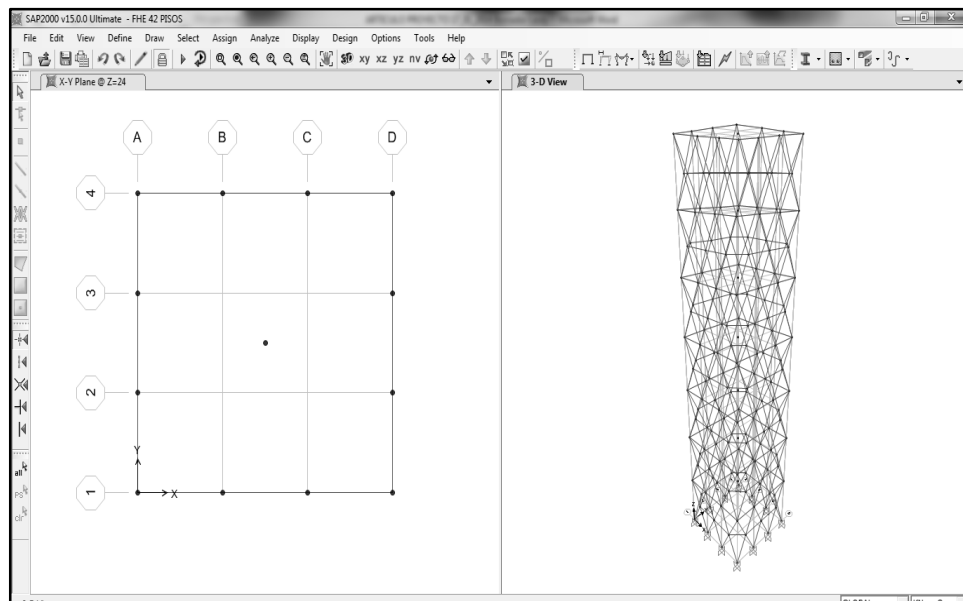
Con las características geométricas de la edificación a analizar, se procede a generar la geometría de manera automática (ver sección 2). En la Figura 22 se puede ver la geometría generada utilizando la herramienta creada para este fin.

**Figura 22.** Geometría generada con la aplicación, utilizando Rhinoceros + Grasshopper + MatLab.



Adicionalmente, de ser requerido, se puede llevar la geometría a un software de diseño estructural como SAP 2000 con el fin de realizar un diseño estructural. Este paso no forma parte de la metodología planteada en el presente proyecto, sin embargo, en la Figura 23 se puede ver la geometría importada desde SAP2000 (a manera de ejemplo).

**Figura 23.** Geometría importada de Rhinoceros desde SAP2000.



### Paso 3: Cálculo aproximado del cortante y momento mediante el uso de la Fuerza Horizontal Equivalente

Se estiman las cargas de la edificación con base a la NSR-10 (ver sección 3).

En la Tabla 2 se pueden ver los parámetros necesarios para calcular las cargas de manera aproximada.

**Tabla 2.** Parámetros cálculo de cargas con base en el Título B de la NSR-10

PARÁMETROS CÁLCULO DE CARGAS		
Espesor acabado de piso	0,05	[m]
Longitud total de vigas en planta tipo	374,91	[m]
Área perfil	0,019	[m <sup>2</sup> ]
Área Planta tipo	1296	[m <sup>2</sup> ]
Cantidad de pisos	42	

En la Tabla 3 se registra un resumen de las cargas totales para la estructura Diagrid.

**Tabla 3.** Resumen de Cargas.

Carga Muerta	376351,4	[kN]
Carga Viva	97977,6	[kN]
W Total	474329,0	[kN]
Módulo	67761,3	[kN]

Como se mencionó en el numeral 3, es necesaria la suposición de un área para la sección transversal con el fin de determinar el peso de la estructura, esto se puede hacer debido a que el peso de la DIAGRID, comparado con el peso total de la estructura, representa un porcentaje muy bajo. Por lo tanto, cualquier variación de las áreas no alteraría de manera significativa el peso total. Como se puede ver en la ecuación (18).

$$\% \text{ PESO DIAGRID} = \frac{29870,9}{474329,0} * 100 = 6,3\% \quad (18)$$

Para la determinación preliminar de cargas sísmicas o laterales se emplea el método de Fuerza Horizontal Equivalente [3], mostrándose en la Tabla 4 los parámetros utilizados para la realización de este.

**Tabla 4.** Parámetros FHE.

Ct	0,073	
$\alpha$	0,75	
Ta	3,41	[s]
Aa	0,25	
Av	0,25	
Fa	1,15	
Fv	1,55	
TL	3,72	[s]
I	1	
Sa	0,149	
Vs=	70.707,57	[kN]
k	2	

Una vez estimadas las cargas y realizado el análisis sísmico mediante el método mencionado, se calcula el cortante y el momento. En la Tabla 5, se dan los resultados del análisis sísmico mediante FHE.

**Tabla 5.** Resultados del Análisis Sísmico.

Módulo	Masa [kg]	Altura [m]	$h$ acum. [m]	$(m_i * h_i)^k$ [kg.m]	$Cvx$	$Fx$ [kN]	Momento [kN.m]	$Vx$ [kN]
1	6907369	24	24	3978644354	0,0071	505	9503098	70708
2	6907369	24	48	15914577418	0,0286	2020	7806116	70203
3	6907369	24	72	35807799189	0,0643	4545	6121256	68182
4	6907369	24	96	63658309670	0,1143	8081	4484880	63637
5	6907369	24	120	99466108860	0,1786	12626	2957597	55556
6	6907369	24	144	143231196758	0,2571	18182	1624254	42930
7	6907369	24	168	194953573365	0,3500	24748	593944	24748

#### **Paso 4: Estimación preliminar de las áreas de las secciones transversales de los elementos del exoesqueleto.**

A continuación, en la Tabla 6, se muestran los parámetros necesarios para calcular el área aplicando las ecuaciones (16) y (17) descritas en la sección 3.3. En la Tabla 7, se pueden observar los valores de las áreas de las secciones transversales para los elementos del exoesqueleto.

**Tabla 6.** Parámetros para el cálculo de las áreas de los elementos del exoesqueleto.

$L_d$	26,83	[m]
$\gamma^*$	3,33E-03	
$\chi^*$	7,94E-05	
$h$	24	[m]
$\theta$	1,100	[rad]
$E_d$	2,00E+11	[Pa]
$\cos^2 \theta$	0,206	
$\sin^2 \theta$	0,794	
$N_w$	6	
$N_f$	8	
$B$	36	[m]

**Tabla 7.** Resultados pre dimensionamiento de los elementos diagonales del exoesqueleto para Diagrid de 42 pisos

PISO	$V$ [kN]	$M$ [kN.m]	Ad. Momento [m <sup>2</sup> ]	Ad. [Cortante [m <sup>2</sup> ]
37-42	24748	593944	0,0102	<b>0,0168</b>
31-36	42930	1624254	0,0278	<b>0,0291</b>
25-30	55556	2957597	<b>0,0506</b>	0,0377
19-24	63637	4484880	<b>0,0768</b>	0,0431
13-18	68182	6121256	<b>0,1048</b>	0,0462
7-12	70203	7806116	<b>0,1336</b>	0,0476
1-6	70708	9503098	<b>0,1626</b>	0,0479

#### 4.2 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UNA PLANTA RECTANGULAR

##### Paso 1: Definición de parámetros geométricos

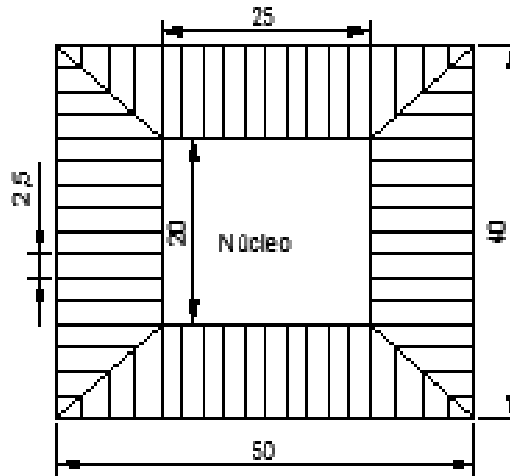
En la siguiente tabla se registran los parámetros geométricos del ejemplo a analizar.

**Tabla 8.** Datos geométricos iniciales

Área	50X40	[m <sup>2</sup> ]
Altura	240	[m]
Cantidad de pisos	60	
Altura Entrepiso	4	[m]
Altura de Módulo	24	[m]
Angulo de Inclinación	69°	

A continuación en la Figura 24, se muestra la planta rectangular con sus dimensiones y los parámetros de la Tabla 8.

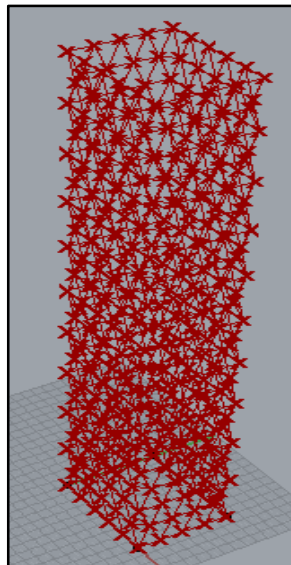
**Figura 24.** Planta Rectangular Edificio 60 Pisos.



**Paso 2: Generación automática de la geometría**

En la Figura 25 se observa la geometría generada con base a los parámetros geométricos iniciales.

**Figura 25.** Geometría generada con la aplicación, utilizando Rhinoceros + Grasshopper + MatLab.



**Paso 3: Cálculo aproximado del cortante y momento mediante el uso de la Fuerza Horizontal Equivalente.**

En la Tabla 9 y 10 se muestra el resumen de cargas para la estructura y el resultado del análisis sísmico.

**Tabla 9.** Valores de las Cargas de la estructura.

Carga Muerta	962571,1	[kN]
Carga Viva	216000,0	[kN]
W Total	1178571,1	[kN]
W Módulo	117857,1	[kN]

**Tabla 10.** Resultados del Análisis Sísmico.

Módulo	Masa [kg]	Altura [m]	$h$ acum. [m]	$(m_i * h_i)^k$ [kg.m]	$C_{vx}$	$F_x$ [kN]	Momento [kN.m]	$V_x$ [kN]
1	12013977	24	24	6920050701	0,0026	267	19402827	102894
2	12013977	24	48	27680202804	0,0104	1069	16933376	102627
3	12013977	24	72	62280456310	0,0234	2405	14470339	101557
4	12013977	24	96	110720811218	0,0416	4276	12032960	99152
5	12013977	24	120	173001267528	0,0649	6681	9653307	94876
6	12013977	24	144	249121825240	0,0935	9621	7376281	88195
7	12013977	24	168	339082484354	0,1273	13096	5259609	78573
8	12013977	24	192	442883244871	0,1662	17104	3373847	65478
9	12013977	24	216	560524106790	0,2104	21648	1802378	48373
10	12013977	24	240	692005070111	0,2597	26726	641416	26726

**Paso 4: Estimación preliminar de las áreas de las secciones transversales de los elementos del exoesqueleto.**

Se muestran de manera resumida en la Tabla 11, los parámetros necesarios para el cálculo de las áreas y en la Tabla 12 los valores de éstas.

**Tabla 11.** Parámetros para el cálculo de las áreas de los elementos del exoesqueleto.

$L_d$	26	[m]
$\gamma^*$	2,50E-03	
$\chi^*$	6,25E-05	
$h$	24	[m]
$\theta$	1,204	[rad]
$E_d$	2,00E+11	[Pa]
$\cos^2\theta$	0,128	
$\sin^2\theta$	0,872	
$N_w$	8	
$N_f$	12	
$B$	40	[m]

**Tabla 12.** Resultados pre dimensionamiento de los elementos diagonales del exoesqueleto para Diagrid de 60 pisos

<i>PISO</i>	<i>V [kN]</i>	<i>M[kN.m]</i>	<i>Ad. Momento [m<sup>2</sup>]</i>	<i>Ad. [Cortante [m<sup>2</sup>]</i>
55-60	26726	641416	0,0066	<b>0,0282</b>
49-54	48373	1802378	0,0187	<b>0,0510</b>
43-48	65478	3373847	0,0349	<b>0,0690</b>
37-42	78573	5259609	0,0545	<b>0,0828</b>
31-36	88195	7376281	0,0764	<b>0,0930</b>
25-30	94876	9653307	<b>0,1000</b>	0,1000
19-24	99152	12032960	<b>0,1246</b>	0,1045
13-18	101557	14470339	<b>0,1499</b>	0,1071
7-12	102627	16933376	<b>0,1754</b>	0,1082
1-6	102894	19402827	<b>0,2010</b>	0,1085

#### 4.3 EJEMPLO DE APLICACIÓN PARA UNA PLANTA HEXAGONAL

##### **Paso 1: Definición de parámetros geométricos:**

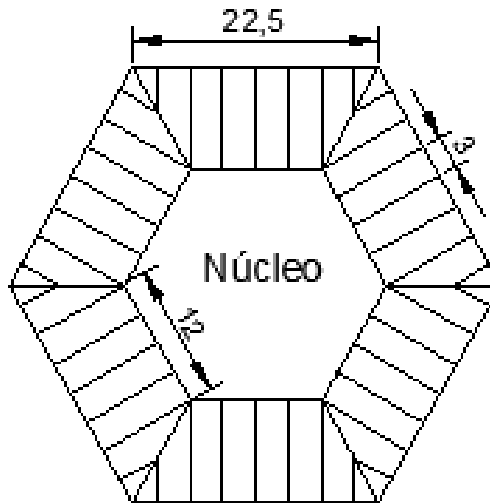
En la siguiente tabla se registran los parámetros geométricos del ejemplo a analizar.

**Tabla 13.** Datos geométricos iniciales

Área	1315,28	[m <sup>2</sup> ]
Altura	240	[m]
Cantidad de pisos	60	
Altura Entrepiso	4	[m]
Altura de Módulo	24	[m]
Angulo de Inclinación	63°	

A continuación en la Figura 26, se muestra la planta hexagonal con sus dimensiones y los parámetros de la Tabla 13.

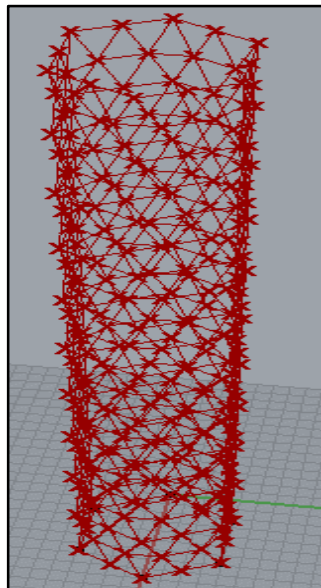
**Figura 26.** Planta Hexagonal 60 pisos.



**Paso 2: Generación automática de la geometría.**

En la Figura 27 se observa la geometría generada con base a los parámetros geométricos iniciales.

**Figura 27.** Geometría generada con la aplicación, utilizando Rhinoceros + Grasshopper + MatLab.



**Paso 3: Cálculo aproximado del cortante y momento mediante el uso de la Fuerza Horizontal Equivalente.**

En la Tabla 14 y 15 se muestra el resumen de cargas para la estructura y el resultado del análisis sísmico.

**Tabla 14.** Valores de las Cargas de la estructura.

RESUMEN DE CARGAS		
Carga Muerta	638205,8	[kN]
Carga Viva	142050,2	[kN]
W Total	780256,1	[kN]
W Módulo	78025,6	[kN]

**Tabla 15.** Resultados del Análisis Sísmico.

Módulo	Masa [kg]	Altura [m]	$h$ acum. [m]	$(m_i * h_i)^k$ [kg.m]	$C_{vx}$	$F_x$ [kN]	Momento [kN.m]	$V_x$ [kN]
1	7953681	24	24	4581320009	0,0026	176,93	12845362	68119
2	7953681	24	48	18325280036	0,0104	707,73	11210498	67942
3	7953681	24	72	41231880082	0,0234	1592,40	9579880	67235
4	7953681	24	96	73301120145	0,0416	2830,93	7966248	65642
5	7953681	24	120	114533000227	0,0649	4423,33	6390833	62811
6	7953681	24	144	164927520327	0,0935	6369,60	4883361	58388
7	7953681	24	168	224484680445	0,1273	8669,73	3482049	52018
8	7953681	24	192	293204480582	0,1662	11323,74	2233607	43349
9	7953681	24	216	371086920736	0,2104	14331,60	1193239	32025
10	7953681	24	240	458132000909	0,2597	17693,34	424640	17693

**Paso 4: Estimación preliminar de las áreas de las secciones transversales de los elementos del exoesqueleto.**

Se muestran de manera resumida en la Tabla 16, los parámetros necesarios para el cálculo de las áreas y en la Tabla 17 los valores de éstas.

**Tabla 16.** Parámetros para el cálculo de las áreas de los elementos del exoesqueleto.

$L_d$	26,51	[m]
$\gamma^*$	3,00E-03	
$\chi^*$	5,83E-05	
$h$	24	[m]
$\theta$	1,10	[rad]
$E_d$	2,00E+11	[Pa]
$\cos^2 \theta$	0,206	
$\sin^2 \theta$	0,794	
$N_w$	9	
$N_f$	7	
$B$	45	[m]

**Tabla 17.** Resultados pre dimensionamiento de los elementos diagonales del exoesqueleto para Diagrid de 60 pisos

PISO	$V$ [kN]	$M$ [kN.m]	Ad. Momento [m <sup>2</sup> ]	Ad. [Cortante [m <sup>2</sup> ]
55-60	17693	424640	0,0071	<b>0,0088</b>
49-54	32025	1193239	<b>0,0201</b>	0,0159
43-48	43349	2233607	<b>0,0376</b>	0,0215
37-42	52018	3482049	<b>0,0586</b>	0,0258
31-36	58388	4883361	<b>0,0822</b>	0,0290
25-30	62811	6390833	<b>0,1075</b>	0,0312
19-24	65642	7966248	<b>0,1340</b>	0,0326
13-18	67235	9579880	<b>0,1612</b>	0,0334
7-12	67942	11210498	<b>0,1886</b>	0,0337
1-6	68119	12845362	<b>0,2161</b>	0,0338

## 5. CONCLUSIONES

El sistema estructural Diagrid ha sido utilizado a nivel mundial para el diseño y la construcción de edificios en altura, proporcionando ventajas significativas como el aumento de la rigidez lateral (en comparación con otros sistemas estructurales), su gran potencial estético, y la libertad que presenta para modular arquitectónicamente espacios interiores.

En este trabajo de investigación se logró desarrollar una aplicación que genera automáticamente la geometría para cualquier tipo de planta arquitectónica que conserve su forma en altura. Vale la pena resaltar que dicho proceso únicamente requiere como datos de entrada los vértices que definen la planta arquitectónica, el ángulo de inclinación de las diagonales, y parámetros de altura (número de pisos y módulos).

Adicionalmente, se presentó una guía para llevar a cabo una configuración estructural conceptual de una estructura DIAGRID, incluyendo la ubicación y conformación del núcleo, de las vigas perimetrales, y del exoesqueleto. Posteriormente, se expuso una metodología para aproximar las dimensiones de los elementos pertenecientes al exoesqueleto.

En síntesis, el trabajo de investigación desarrollado le permite al diseñador plantear, en la fase conceptual de diseño, la totalidad de un edificio en altura que utilice el sistema estructural DIAGRID, con la facilidad de generar la geometría compleja del mismo de manera automática.

Como paso siguiente en el proceso de investigación, se propone aplicar técnicas de computación evolutiva multi-objetiva para optimizar todos los parámetros geométricos de una estructura DIAGRID. Como funciones objetivo, se podría contemplar el peso, la deriva, y la rigidez de la estructura, entre otras.

## CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fenix Construcciones S.A. Available: <http://www.fenixconstrucciones.com/> [citado 18 de Enero de 2014].
- [2] Prabyc Ingenieros SAS. Available: <http://prabyc.com.co/> [citado 21 de Enero de 2014].
- [3] Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente (NSR-10).2010.
- [4] Khushbu Jani, Paresh V. Patel, “Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings”, Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE-2012), vol. 51, 2013, pp. 92 – 100.
- [5] Katayoon Taghizadeh, Seyedpooya Seyedinnoor, “Super-Tall Buildings Forms Based on Structural Concepts and Energy Conservation Principles”, Architecture Research, vol. 3, No. 2, 2013, pp. 13-19.
- [6] Kyoung-Sun Moon, Jerome J. Connor and John E. Fernandez, “Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design”, The Structural Design of Tall and Special Buildings, vol. 16, 2007, pp. 205-230.
- [7] Foster + Partners. Available: <http://www.fosterandpartners.com/> [citado 21 de Enero 2014].
- [8] Robert Matthew Johnson Marshall (RMJM). Available: <http://www.rmjm.com/> [citado 21 de Enero 2014].
- [9] Dominic Munro, MA MStructE, Associate, Ove Arup and Partners, London, “Swiss Re’s Building, London”, NYHETER OM STÅLBYGGNAD, NR 3, Octubre 06 de 2004, pp. 36-43.
- [10] 30 St Mary Axe - The Gherkin. Available: [http://www.30stmaryaxe.com/photo\\_construction.html](http://www.30stmaryaxe.com/photo_construction.html) [citado 25 de Enero de 2014].
- [11] Nigel Young/Foster and Partners, “Hearst Tower Un diamante high-tech”, Técnicas de vanguardia constructivas, pp. 15-19.
- [12] Arias Schickler Carlota, “El Capital Gate: La Torre Inclinada que Desafía la Gravedad”, Metal Actual, pp. 60-65.

## BIBLIOGRAFÍA

ARIAS SCHICKLER, Carlota. El Capital Gate: La Torre Inclinada que Desafía la Gravedad. (en línea) Metal Actual. Disponible en Internet: [http://metalactual.com/revista/24/construccion\\_capital.pdf](http://metalactual.com/revista/24/construccion_capital.pdf).

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, Marzo 2010.

JANI, Khushbu. PATEL, Paresh V. Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings, Chemical, Civil and Mechanical Engineering Tracks of 3rd Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE-2012). vol. 51. 2013. pp. 92 – 100.

MOON, Kyoung-Sun. et al. Diagrid Structural Systems for Tall Buildings: Characteristics and Methodology for Preliminary Design. The Structural Design of Tall and Special Buildings. vol. 16. 2007. pp. 205-230.

MUNRO, Dominic. MA MStructE, ASSOCIATE. OVE ARUP AND PARTNERS, London. Swiss Re's Building. (on line) Nyheter Om Stålbyggnad. NR 3. Octubre 06 de 2004, pp. 36-43. Available from: <http://www.epab.bme.hu/oktatas/2009-2010-2/v-CA-B-Ms/FreeForm/Examples/SwissRe.pdf>.

TAGHIZADEH, Katayoon. SEYEDINNOOR, Seyedpooya. Super-Tall Buildings Forms Based on Structural Concepts and Energy Conservation Principles. Architecture Research. vol. 3. No. 2. 2013. pp. 13-19.

YOUNG, Nigel. FOSTER AND PARTNERS. Hearst Tower Un diamante high-tech. (en línea) Técnicas de vanguardia constructivas. pp. 15-19. Disponible en Internet: [http://www.norquimia.com/esp/revista/Hearst\\_Tower.pdf](http://www.norquimia.com/esp/revista/Hearst_Tower.pdf).