

Estado del Arte del Sistema Estructural Diagrid

Nelson Fabian Soto Gamboa

Trabajo de Grado para Optar el Título de Especialista en Estructuras

Director

Néstor Iván Prado García

Ingeniero Civil, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Especialización en Estructuras

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios por la oportunidad y la persistencia para llevar a cabo este proyecto, también a mi familia por todo el apoyo en cada uno de los propósitos que me he trazado, a mi novia por la paciencia que tuvo, agradecer a todos los docentes quienes compartieron sus conocimientos y de manera especial al Ing. Néstor Prado por su tiempo dedicado como director de proyecto y agradecer al personal administrativo de la Universidad Industrial de Santander y en especial a Nury Salcedo por todas la ayudas brindadas durante este proceso académico.

Nelson Fabián Soto Gamboa

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Alcance	16
3. ¿Qué es la Diagrid?.....	16
4. Antecedentes	17
5. Historia del Sistema Diagrid.....	19
5.1 La torre de Shabolovka	21
5.2 Primer edificio aplicando el sistema Diagrid.....	23
6. Avance tecnológico del sistema Diagrid.....	24
7. Configuración conceptual	26

7.1 Módulos	28
7.1.1 Módulos regulares.....	28
7.1.2 Módulos irregulares.	29
7.2 Configuración del exoesqueleto.....	30
7.2.1 Ángulo de óptimo uniforme de los elementos diagonales.	30
7.2.2 Variación de ángulo óptimo.....	34
7.3 Configuración del núcleo	35
7.4 Distribución de cargas.....	37
8. Generación geométrica de una estructura Diagrid.....	38
8.1 Desarrollo de modelos estructurales implementando Grasshoper, Rhinoceros 3D y Matlab.	41
9. Metodologías de pre-dimensionamiento de las diagonales	44
9.1 Pre-dimensionamiento de los elementos diagonales con ángulo óptimo uniforme	44
9.2 Diseño óptimo basado en rigidez.....	45
9.2.1 Rigidez al corte y flexión de la estructura Diagrid.	45
9.2.2 Desplazamiento y deformaciones por cortante y flexión.....	47
9.2.3 Definición alternativa del factor s	48
9.3 Pre-dimensionamiento de los elementos diagonales con ángulo óptimo variable.....	50
10. Sistema de arriostramiento secundario (Secondary Bracing System – SBS)	51
10.1 Necesidad de SBS	54

11. Método matricial para el análisis estructural de sistemas Diagrid.....	58
11.1 Análisis de sistemas Diagrid bidimensionales.....	59
11.2 Análisis de sistemas Diagrid tridimensionales	61
12. Efecto de retraso de corte en estructuras Diagrid	62
12.1 Efecto de retraso de corte.....	62
12.2 Efecto de retraso de corte para estructuras Diagrid	64
13. Optimización.....	64
14. Diseño sísmico de estructuras Diagrid.....	65
14.1 Desempeño sísmico	67
14.2 Factor de modificación de respuesta R	68
14.3 Factor de amplificación de desplazamiento C_d	69
14.4 Factor de sobrerresistencia Ω_0	69
15. Ventajas y desventajas del sistema Diagrid	69
16. Conclusiones.....	71
Referencias Bibliográficas	73

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Capital Gate. (Boake, 2014)	17
Figura 2. Sistema Diagrid vs Sistema tubular arriostrado	18
Figura 3. Ejemplos de edificios que implementa el sistema estructural Diagrid (a) London City Hall (b) Swiss Re Tower (c) Hearst Magazine Tower.....	19
Figura 4. Primera torre Diagrid diseñada por Vladimir Shukhov en 1896.....	21
Figura 5. Comparación en altura de la torre Shabolovka (diseño original), la torre Eiffel y la torre Shabolovka (Construida).	22
Figura 6. Sistema Diagrid en el Edificio IBM.	23
Figura 7. Ausencia de la columna exterior en el sistema Diagrid.	24
Figura 8. Dibujo técnico de diseño de la torre de radio Shabolovka, 1919.....	25
Figura 9. Modelo 3D del edificio Swiss Re´s.	26
Figura 10. Modelo de una estructura Diagrid.	27
Figura 11. Edificio Swiss Re´s (a) Núcleo arriostrado (b) Exoesqueleto.	27
Figura 12. Esquema de modulación del sistema Diagrid.....	28
Figura 13. El edificio Poly Diamond Lantern.....	29
Figura 14. Ángulo poco profundo con respecto a la diagonal.	30
Figura 15. Modelo analítico para evaluar el ángulo óptimo de los elementos diagonales.	31
Figura 16. Ángulo óptimo para máxima rigidez al corte.	33
Figura 17. Gráficos de un edificio de 60 pisos (a) Fuerza de corte (b) Momento flector.....	34

Figura 19. Núcleo en concreto (Capital Gate).	36
Figura 20. Núcleo en concreto Canton Tower.	36
Figura 21. Tipología de una planta cuadrada y circular.....	37
Figura 22. Distribución de carga en un sistema Diagrid.....	38
Figura 23. Ejemplo de modelo estructural de un sistema Diagrid.....	39
Figura 24. Geometría generada mediante el uso de Rhinoceros 3D, Grasshopper y Matlab.	40
Figura 25. Ejemplo de análisis estructural usando Karamba 3D.....	40
Figura 26. Ingreso de puntos de la planta base (a) Planta cuadrada (b) planta hexagonal.	41
Figura 27. Ejemplo de un módulo de 6 pisos con ángulo óptimo de 63°.	42
Figura 28. Esquema de conectividad.	42
Figura 29. Estructura básica para la generación automática de la geometría de la estructura Diagrid	43
Figura 30. Geometría del sistema Diagrid en SAP2000.....	43
Figura 32. (a) Factor s vs Relación de aspecto del edificio con $\alpha = 69^\circ$; (b) Factor S vs Angulo diagonal con relación H/L=6.	50
Figura 33. (a) Diagrama estático de un sistema Diagrid Típico (b) Diagrama estático unas diagonales entre puntos de panel.	52
Figura 34. Esquema de los arriostramientos dentro de los módulos.....	53
Figura 35. Configuración de apoyo de las diagonales (A) y columnas de gravedad del núcleo (B).	55
Figura 36. Relación entre la carga de pandeo de balanceo y la carga de pandeo no balanceado vs. Relación entre el momento de inercia de la diagonal y la columna.....	58
Figura 37. Sistema estructural bidimensional Diagrid.....	60

Figura 38. Sistema estructural diagonal tridimensional.....	61
Figura 39. Distribución de tensión en la viga (a) Sin retraso de corte; (b) Con retraso de corte..	63
Figura 40. Retraso de corte negativo.	63
Figura 41. Estimación iterativa del factor R	66
Figura 42. Modelos considerados por Sadeghi y Rofooei.	67

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Distribución de carga gravitacional y lateral en un sistema Diagrid de 36 pisos	37
Tabla 2. Evaluación del desempeño sísmico de diferentes modelos de varios factores R.	68

Resumen

Título: Estado del Arte del Sistema Estructural Diagrid*

Autor: Nelson Fabian Soto Gamboa**

Palabras claves: Sistema estructural Diagrid, Angulo Optimo, Diseño Sísmico, Módulos, Configuración.

Descripción

El sistema estructural Diagrid se ha utilizado con regularidad para edificios altos, debido a que proporcionan mayor eficiencia estructural y arquitectónicamente es más atractivo en comparación a los sistemas tradicionales. Este sistema se conforma principalmente por diagonales, que a su vez eliminan los elementos verticales en su exterior. La Diagrid se caracteriza por tomar geometrías complejas que aumentan su rigidez. El presente documento tiene como finalidad describir un sistema estructural que aún no se ha aplicado en Colombia y mostrarlo como una alternativa en el diseño y construcción de Edificios de gran altura. En el documento se da a conocer la evolución del Diagrid como sistema estructural, los avances tecnológicos en el dibujo asistido, se describe su configuración conceptual, métodos optados para pre-dimensionar los elementos que lo componen basados en la rigidez, la posibilidad de acoplarlo a un sistema de arriostramiento secundario para mejorar su eficiencia y la aplicación de método matricial para analizar la estructura. Adicionalmente, se expone el efecto de retraso de corte, los avances que ha tenido en el diseño sísmico y la aplicación de métodos de optimización para la generación geométrica de una estructura Diagrid y las ventajas y desventajas que presenta este tipo de sistema estructural.

* Monografía

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Néstor Iván Prado García, PhD.

Abstract

Title: State of the Art of the Diagrid Structural System*

Author: Nelson Fabian Soto Gamboa**

Keywords: Diagrid structural system, Optimal angle, Seismic Design, Modules, Configuration.

Description

The Diagrid structural system has been used regularly for tall buildings, because they provide greater structural efficiency and architecturally it is more attractive compared to traditional systems. This system is mainly made up of diagonals, which in turn eliminate vertical elements outside. Diagrid is characterized by taking complex geometries that increase its rigidity. The purpose of this document is to describe a structural system that has not yet been applied in Colombia and show it as an alternative in the design and construction of high-rise buildings. The document reveals the evolution of Diagrid as a structural system, technological advances in assisted drawing, its conceptual configuration is described, methods chosen to pre-dimension the elements that compose it based on stiffness, the possibility of coupling it to a secondary bracing system to improve its efficiency and the application of matrix method to analyze the structure. Additionally, the effect of cutting delay, the advances it has had in the seismic design and the application of optimization methods for the geometric generation of a Diagrid structure and the advantages and disadvantages of this type of structural system is exposed.

* Monograph

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Néstor Iván Prado García, PhD

Introducción

El rápido crecimiento de la población urbana, la escasez de terrenos y el aumento de los precios de estos mismos, han producido un incremento en el diseño y construcción de edificios en altura. Por ejemplo, proyectos de gran envergadura, como 432 Park Avenue de Nueva York, Princess Tower de Dubai, son un claro ejemplo de esto.

La preocupación principal para realizar el diseño de estos edificios, es definir su sistema estructural, el cual debe ser eficiente y tiene que otorgar economía, estética y viabilidad técnica y constructiva. Debido a que en la edificación al aumentar su altura, el sistema estructural debe resistir fuerzas laterales (sísmicas y/o viento) y transportar las cargas gravitacionales.

Para resolver la condición estructural; Colombia tiene diferentes sistemas estructurales desarrollados para las edificaciones y están reglamentados en la NSR-10 (AIS, 2010), los cuales son: Muros de carga, combinado, dual y pórtico (esté último siendo el más usado). No obstante, las diferentes limitaciones que tienen los sistemas con respecto a la rigidez y la relación demanda capacidad, surgen estructuras muy poco eficientes y que en muchas ocasiones son costosas.

Es por esto que se realiza una compilación de información de un sistema estructural desarrollado en la actualidad para edificios de gran envergadura y que es utilizado por su eficiencia y potencial arquitectónico conocido como Diagrid y que se puede considerar como la evolución del sistema tubular arriostrado, por causa de que se conforma de elementos diagonales y están distribuidos en todo su perímetro y que a su vez está constituido por un núcleo que aporta resistencia gravitacional.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar una compilación de información acerca del estado de desarrollo del sistema estructural Diagrid.

1.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información de la historia y evolución del sistema estructural Diagrid.
- Describir metodologías de diseño que definan la configuración y pre-dimensionamiento de los elementos.
- Identificar ventajas del sistema estructural Diagrid.
- Presentar avances en el diseño sísmico del sistema estructural Diagrid

2. Alcance

Este documento presenta un estado del arte del sistema estructural Diagrid que pretende describir el proceso de evolución y aplicación del sistema. Los parámetros que se han tenido en cuenta en el documento son: metodologías de pre-dimensionamiento y definición del ángulo óptimo de los elementos con base en rigidez, desplazamiento y deformaciones. Adicionalmente, se describe de forma breve el estado de desarrollo del diseño sísmico y efectos que pueden afectar el sistema. Se omiten en la revisión aspectos como el diseño por viento y procesos detallados de optimización.

3. ¿Qué es la Diagrid?

El término Diagrid es la combinación de las palabras “diagonal” y “grid” y se refiere a un sistema estructural que gana su integridad mediante la triangulación (Boake, 2014). Este sistema ha evidenciado ser adaptable en la estructuración de una amplia gama de formas y ofrece un soporte estructural a edificios no rectilíneos como se aprecia en la *Fig. 1*. El sistema Diagrid puede soportar todas las cargas de gravedad y cargas laterales en la estructura sin necesidad de un núcleo estructural tradicional y se caracteriza por tomar curvaturas complejas las cuales aumentan su rigidez; también es muy usual ver el sistema en cubierta de grandes luces sin columnas.

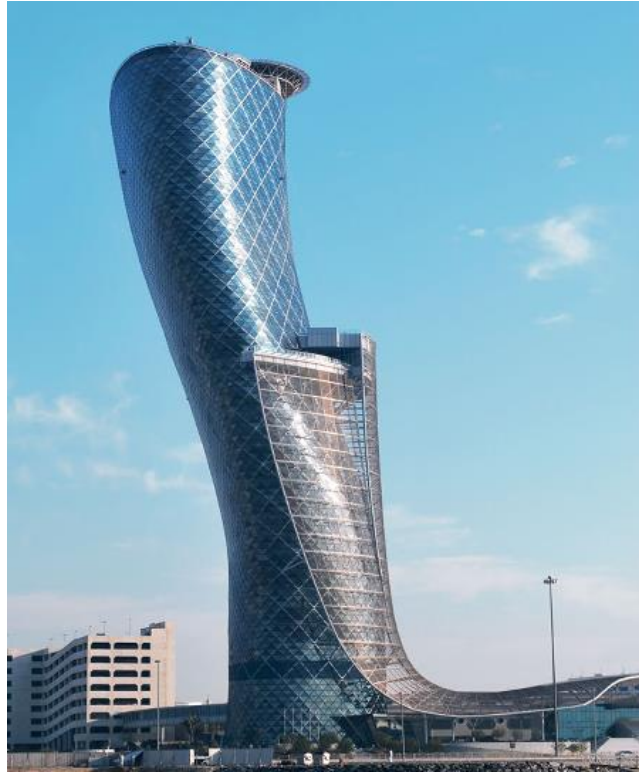


Figura 1. Capital Gate. (Boake, 2014)

4. Antecedentes

Los sistemas estructurales usados en edificios, han evolucionado con el propósito de promover mejor eficiencia enfocada en el ahorro de material y su comportamiento. Edificios emblemáticos como el Empire State ubicado en la ciudad de Nueva York, construido durante los años 30 del siglo XX, se utilizaron marcos de acero resistentes momentos, lo que resultó en un material estructural considerable. En la década de los años 60 del mismo siglo, hubo un avance tecnológico con respecto al análisis y diseño estructural para edificios, recurriendo a estructuras tubulares.

Estas ubican los elementos resistentes sobre el perímetro del edificio, en lo que derivó en uso más eficiente del material y de manera consecutiva un ahorro notable en el peso de la estructura.

Dos décadas después, se comprendió que para diseñar sistemas tubulares, se encontraba una alternativa disponible y era aquella que usa diagonales perimetrales. Lo que resultó en mayor disminución del peso de la estructura, ya que las fuerzas cortantes producidas por acciones como el viento o sismo son soportadas de manera más eficiente, mediante deformaciones axiales desarrolladas por elementos diagonales que por deformaciones a flexión de los miembros de un marco resistente a momento (Ramírez, Terán y Serrano, 2018).

Hay que mencionar que el sistema de rejilla perimetral y el tubular arriostrado convencional se diferencian en que los elementos verticales del primer sistema son eliminados (*ver Fig. 2*), debido a que las diagonales soportan las cargas verticales y laterales de manera simultánea.

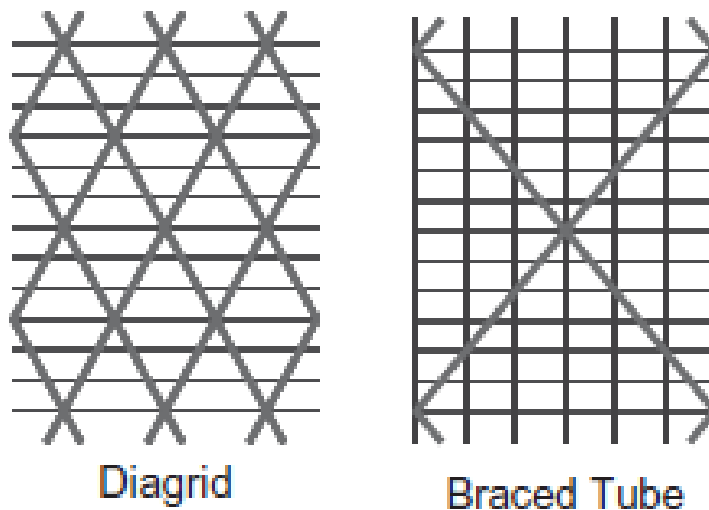


Figura 2. Sistema Diagrid vs Sistema tubular arriostrado. (Moon, Connor y Fernández, 2007)

5. Historia del Sistema Diagrid

Las estructuras que han implementado elementos diagonales se han convertido en uno de los enfoques más innovadores para los edificios en la actualidad. La aplicación del sistema Diagrid como lenguaje estructural contemporáneo comenzó a principios de la década de 2000, debido a que tres proyectos se encontraban en marcha simultáneamente desarrollado por Foster y Partners. London City Hall, terminado en el 2002, Swiss Re Tower, terminado en el año 2004, estos dos proyectos hechos en Londres y The Hearst Magazine Tower de New York, terminado en el 2006 (*ver la Fig. 3*).



Figura 3. Ejemplos de edificios que implementa el sistema estructural Diagrid (a) London City Hall (b) Swiss Re Tower (c) Hearst Magazine Tower. (Boake, 2014)

Pese al reciente aumento en la construcción de edificios Diagrid, el origen de este sistema estructural se remonta en el periodo ubicado entre las últimas décadas de siglo XIX y las primeras del XX, cuando el ingeniero ruso Vladimir Shukhov indagó en la conveniencia usar elementos diagonales en una estructura de gran altura.

Shukhov fue uno de los ingenieros más prolíficos de su tiempo, desarrolló cientos de estructuras civiles, puentes, cubiertas estructurales configuradas con células romboidales y techos en celosías, que con el tiempo evolucionarían al sistema Diagrid.

La creación de un nuevo sistema estructural por parte de los constructores rusos, fue el resultado de una serie de factores convergentes, como lo fue la industrialización en la última parte del siglo XIX. La invención del acero estructural aplicando el método Bessemer dio como resultado un material más resistente que cualquier lo hubiera precedido (Boake, 2014). El acero era capaz de ser producido en masa en una serie de perfiles y secciones estándar. En particular, tenía propiedades de tracción superiores en comparación al acero forjado o fundido, permitiendo así la experimentación de nuevo tipo de formas estructurales. La creación del esqueleto en acero, separó la función estructural del marco muro cortina, en virtud de ello el acero se convirtió en el material predominante para la construcción en altura.

Las estructuras en celosía comenzaron a usarse comienzo del siglo XIX en la construcción de puentes y luego en techos de gran envergadura, pero construidas con hierro forjado, debido a que se desempeñó mejor que el acero fundido. No obstante, la mayoría de estructuras no podían aprovechar el potencial de crear fuerzas de tensión. No fue hasta que surgió el campo de la ingeniería estructural durante el siglo XIX.

Indudablemente, la ingeniería y la física se aplicaron de forma predictiva, pero la matemática dependía de la geometría Euclidiana y no se podía aplicar a estructuras no rectilíneas.

“En 1829, el matemático ruso Nikolai Ivanovich Lobachevsky publicó una prueba del quinto postulado paralelo de Euclides utilizando el caso de una superficie doblemente curvada, estableciendo así una geometría no Euclidiana. Según una investigación histórica realizada por

Elizabeth C. English (2000), hubo una conexión directa entre los descubrimientos matemáticos de Lobachevsky y las exploraciones estructurales de Vladimir Shukhov.” (Boake, 2014).



Figura 4. Primera torre Diagrid diseñada por Vladimir Shukhov en 1896. (Boake, 2014)

Shukhov dirigió su atención al desarrollo de un sistema eficiente para una torre que lleva una gran carga de gravedad concentrada en la parte superior (el problema de la torre de agua). La Shukhov Tower *Fig. 4*, se basa en un enrejado diagonal de ángulos de acero. En general la estructura, desde la base hasta la parte superior sigue una curva parabólica. La forma hiperbólica de la torre es similar a la pseudoesférica utilizada por Lobachevsky (Agkathidis y Edemskaya, 2016).

5.1 La torre de Shabolovka

Después de una serie de pruebas y experiencias, en 1918 Shukhov desarrolló el diseño de una torre de transmisión de radio formada por hiperboloides. El proyecto llamó la atención por su ligereza, debido a que mientras la torre de Shabolovka tenía una altura de 350 m y superaba en 50 m a la torre Eiffel, la primera solo pesaría el 30% del peso de la segunda (Ramírez, Teran y Montserrat,

2018). Sin embargo, la escasez de material derivada de la guerra civil rusa imposibilitó la realización del proyecto y obligó al desarrollo de una segunda versión limitada a una altura de 150 m, como se muestra en la *Fig. 5* (English, 2005).

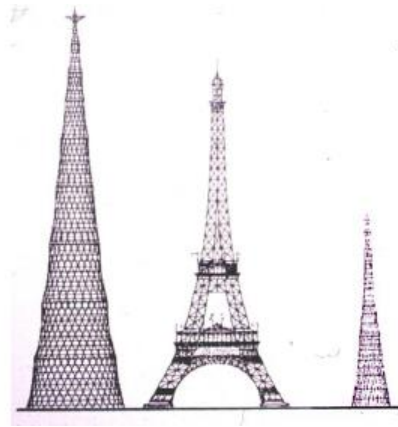


Figura 5. Comparación en altura de la torre Shabolovka (diseño original), la torre Eiffel y la torre Shabolovka (Construida). (English, 2005)

La torre de radio de Moscú apunta a un diseño estructuralmente eficiente, la superficie mínima y la estructura abierta ayuda a reducir las cargas de viento. Shukhov consideró en contar con suficiente rigidez estructural usando elementos rectos, los cuales crean formas hiperboloides en cada uno de sus módulos que conforman la torre (Agkathidis y Edemskaya, 2016).

A Shukhov se le atribuyen el diseño y construcción de más de 200 torres utilizando este sistema durante su carrera.

5.2 Primer edificio aplicando el sistema Diagrid

El edificio IBM (ahora llamado United Steelworkers Building), mostrado en la *Fig. 6*, fue terminado en el año 1963 en Pittsburgh, diseñado por la firma de Leslie E. Robertson. El sistema estructural Diagrid que muestra el edificio IBM influye directamente en el trabajo de Robertson.



Figura 6. Sistema Diagrid en el Edificio IBM. (Boake, 2014)

El sistema Diagrid, junto con el acristalamiento en la estructura, crea una solución más costosa, debido a las ventanas en forma de hexágono, por lo tanto, requirió de fabricación y montajes especiales. A pesar de que el sistema prefabricado usado por IBM nunca se repitió con precisión; más tarde este edificio estableció el concepto que se usa actualmente, un exoesqueleto en sistema Diagrid que combina la carga lateral y de gravedad, eliminando los elementos verticales tanto en el exterior como en el interior (*Fig. 7*), dejando un área de piso abierta y siendo un sistema atractivo para los arquitectos.

El sistema estructural de este edificio está conectado a un núcleo mediante un sistema de piso con marco en acero, sin embargo, este sistema de piso no tiene el mismo nivel de refuerzo, comparado con otros edificios, ya que la carga lateral la soporta el exoesqueleto.



Figura 7. Ausencia de la columna exterior en el sistema Diagrid. (Boake, 2014)

6. Avance tecnológico del sistema Diagrid

Las tecnologías emergentes han redefinido la práctica de la arquitectura y diseñar sin usar una computadora se ha convertido en algo impensable. En los últimos 30 años, los dibujos técnicos han cambiado significativamente. La preferencia en los edificios ortogonales con armazón en acero, se atribuye en parte a la limitación de esquematización y cálculo del siglo XX. Los edificios de estructura en acero podrían calcularse como estructuras determinadas, resolviendo los sistemas de fuerza tridimensional en planos. Sin embargo, las torres hiperbólicas de Shukhov, habrían estado más allá de la mayoría de ingenieros de su tiempo, aplicando algoritmos matemáticos y principios observados por la naturaleza, siendo así el primero en adoptar un enfoque innovador (Boake, 2014).

El nacimiento del sistema Diagrid ocurrió en un momento en que el dibujo asistido por computadora estaba avanzado, como es el uso del Building Information Modeling (BIM). El desarrollo del BIM ha sido fundamental, a razón de que garantiza el diseño y la fabricación de estructuras complejas. La geometría es tan compleja que requiere un alto nivel de precisión, haciendo más complejo la evaluación de cargas en los elementos estructurales y sus conexiones sean mucho más desafiantes que en las estructuras ortogonales y rectilíneas que se pueden simplificar para determinar la transferencia de carga.

Los programas como Catia (Dassault Systèmes SE, 1977), permitieron crear curvas irregulares, los programas BIM como X Steel (Tekla, 1993), creados para ayudar a la ingeniería en los detalles. El cambio de X Steel a Tekla Structures (Tekla, 2004), incorporó significativamente más funcionalidad al software.

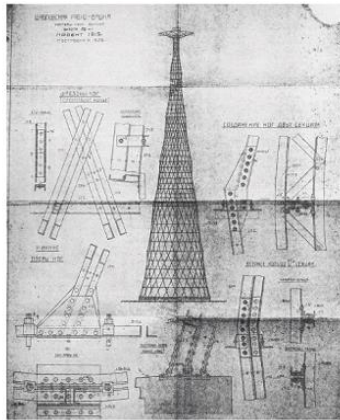


Figura 8. Dibujo técnico de diseño de la torre de radio Shabolovka, 1919. (Boake, 2014)

Las aplicaciones del Diagrid, han explotado la capacidad de la malla triangulada para crear formas geométricas curvas. El término malla, se refiere directamente a la técnica de mapeo del software de modelos 3D. La base del diseño de rejillas perimetrales, es una malla que ajusta curvas complejas, como muestra la *Fig. 9*.

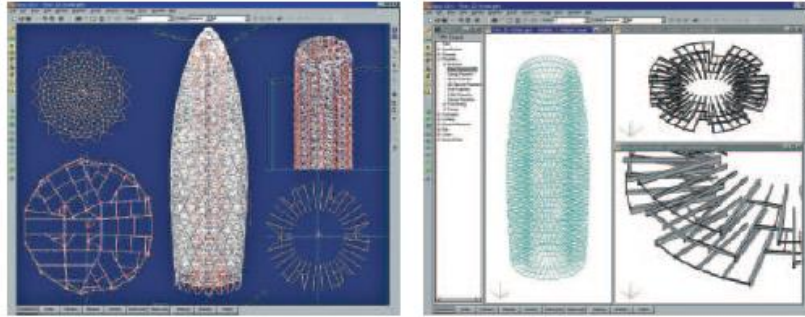


Figura 9. Modelo 3D del edificio Swiss Re's. (Munro et al., 2004)

7. Configuración conceptual

El término Diagrid, se usa comúnmente para describir un panel o cuadrícula en diagonal. Su sistema se compone de elementos diagonales, generalmente fabricados en acero estructural, los cuales se unen puntos nodales. A pesar de que la característica dominante en el sistema Diagrid es el uso de las cuadrículas, es por sí misma inestable, por lo tanto, es necesario que requiera una triangulación en forma de diamante y de esta manera crear capacidad en la estructura.

Las cuadrículas diagonales son la pericia del diseño estructural para construir edificios que combinan las fuerzas de gravedad y laterales de un sistema que elimina el uso de elementos verticales. Este sistema que es triangulado, por lo general se logra cuando las vigas de borde se unen al panel.

El sistema estructural Diagrid, está compuesto por dos partes: un armazón de acero perimetral que proporciona mayor rigidez lateral, por lo tanto soporta las cargas laterales como el sismo o viento y un núcleo que tiene una mayor rigidez a una estructura convencional y puede estar diseñado para transportar cargas gravitacionales como se ilustra en la *Fig.10*.

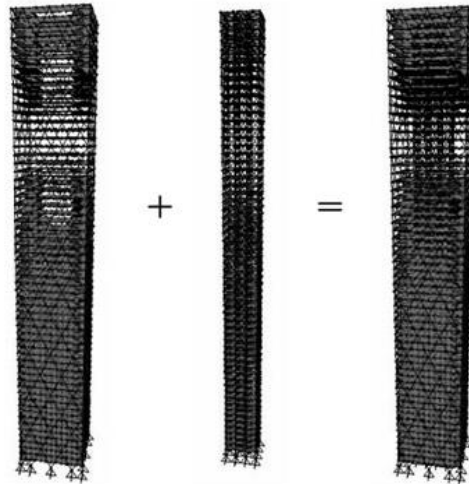


Figura 10. Modelo de una estructura Diagrid. (Moon, Connor y Fernández, 2007)

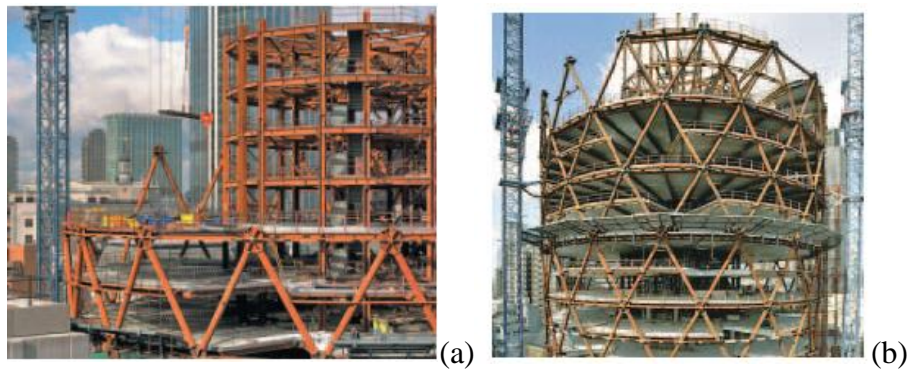


Figura 11. Edificio Swiss Re's (a) Núcleo arriostrado (b) Exoesqueleto. (Munro et al., 2004)

Para que esta configuración funcione, es esencial la presencia de las vigas perimetrales (Fig. 11), de esta manera hay una distribución de cargas del núcleo al Diagrid y garantiza un comportamiento conjunto de la estructura.

La geometría de sistema Diagrid es personalizada y está ligada a las necesidades específicas de quien la diseña, por lo que es importante previo al pre-dimensionamiento, definir los parámetros de diseño tales como:

- Geometría de la planta.
- Ángulo de inclinación de los elementos diagonales perimetrales.
- Altura total de la estructura.
- Altura del módulo del sistema Diagrid.

7.1 Módulos

7.1.1 Módulos regulares. Pese a que el sistema Diagrid se caracteriza por sus elementos diagonales como se muestra en la *Fig. 12*, los elementos horizontales son de igual manera importantes, debido a que mantiene la estabilidad del sistema. Los módulos contemplan una triangulación que abarca de dos a cuatro pisos; las vigas se diseñan junto con los bordes de los pisos y para módulos más altos, es necesario realizar iteraciones entre la viga de borde y las diagonales. Entre más largo sea el miembro diagonal, hay más probabilidad de que requiera un refuerzo lateral adicional o un aumento en la sección transversal del elemento para proporcionar autosuficiencia (Boake, 2014).

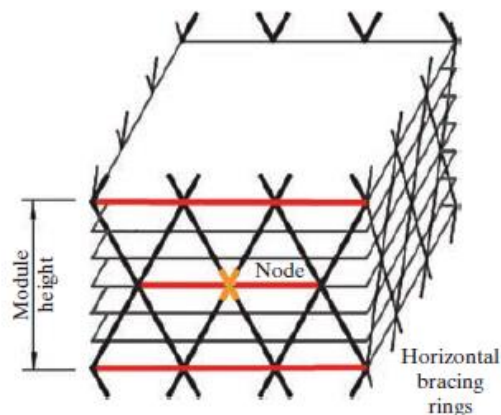


Figura 12. Esquema de modulación del sistema Diagrid. (Boake, 2016)

La distribución de estos módulos, es más compleja de lo que aparenta; dado que en la fachada debe terminar con un módulo completo, de esta manera el número de pisos influye directamente en la decisión en la altura del edificio (Boake, 2016). Es necesario asegurar que la conexión ocurra sólo en los nodos y evitar empalmes en los elementos diagonales.

7.1.2 Módulos irregulares. La evolución y el desarrollo de los Diagrid como sistema estructural a determinado plantear la siguiente pregunta ¿Sirve a la arquitectura o la ingeniería? La mayoría de avances en las estructuras de edificaciones de gran altura han sido impulsados por la ingeniería (Boake, 2016). Las investigaciones realizadas para implantar prácticas mejoradas para las estructuras y la aplicación de la optimización como es el peso de los materiales, parecen en ocasiones ser evitado por completo y eso se debe directamente a su forma. Tal ejemplo sería el caso de CITIC Bank de Foster y Partners en Hangzhou, China y Poly Diamond Lantern de SOM en Beijing, China. Estos dos edificios implementan ángulos no óptimos en el sistema Diagrid, decisión basada en elecciones de estética en la estructura como un componente clave en la arquitectura como se muestra en la *Fig. 13*.



Figura 13. El edificio Poly Diamond Lantern. (Boake, 2016)



Figura 14. Ángulo poco profundo con respecto a la diagonal. Tomado de <https://www.nbmcw.com/tech-articles/tall-construction/38066-unpacking-composite-construction-global-trends.html>, 2018

El ángulo implementado en el edificio de Beijing, China está por debajo de los 69° del que sugiere Moon (2007), esto da como resultado el aumento en la sección de los elementos estructurales del sistema (*Fig. 14*).

7.2 Configuración del exoesqueleto

Para la configuración del exoesqueleto, se hace necesario tener en cuenta dos parámetros: el ángulo de inclinación y la longitud de los miembros diagonales, sin embargo, el primer parámetro puede variar dependiendo de geometría de la estructura optando por usar un único valor del ángulo o cambiarlo con respecto a la altura de la estructura.

7.2.1 Ángulo de óptimo uniforme de los elementos diagonales. Para calcular el ángulo óptimo, se debe considerar la máxima rigidez al corte (Moon, Connor y Fernández, 2007). Este

puede estimarse usando el diagrama de cuerpo libre de un marco reforzado como se muestra en la *Fig. 15*.

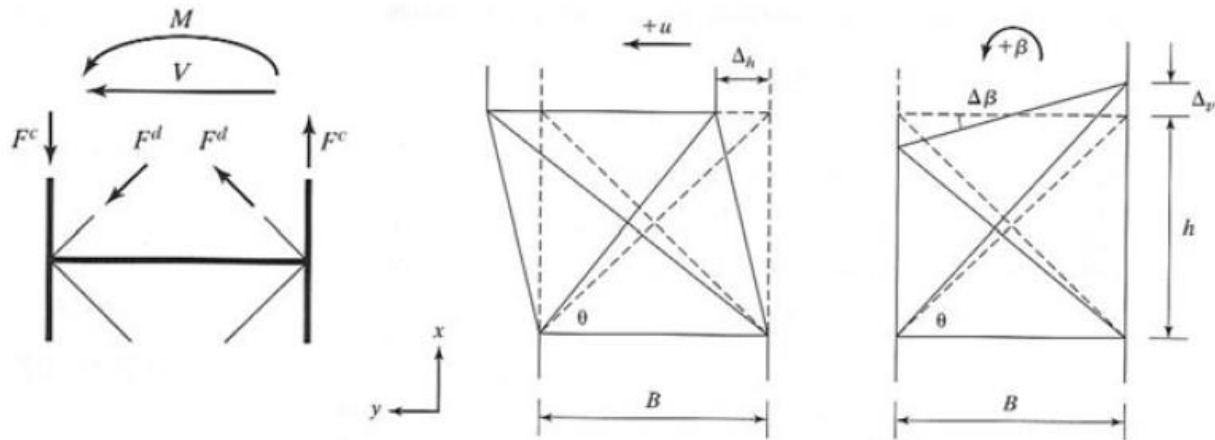


Figura 15. Modelo analítico para evaluar el ángulo óptimo de los elementos diagonales. (Moon, Connor y Fernández, 2007)

Por lo tanto, se asume que los miembros llevan solo carga axial, en consecuencia, la fuerza cortante en la sección transversal está relacionada con las fuerzas de los elementos diagonales, partiendo del diagrama que se muestra en la *Fig. 15*, se expresa que la relación entre estas se muestra en la siguiente ecuación:

$$V = 2F_d \cos \theta \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

F_d : Fuerza axial en la diagonal.

θ : Angulo de inclinación

Luego se supone que el comportamiento de las diagonales es elástico lineal, esto es con la finalidad de relacionar las fuerzas con la deformación de los mismos, de esta manera:

$$F_d = A_d \sigma_d = A_d E_d \varepsilon_d \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

A_d : Área de la sección transversal.

σ_d : Esfuerzo.

E_d : Modulo de elasticidad del elemento.

ε_d : Deformación unitaria.

Sabiendo que de mecánica de materiales, la deformación unitaria es igual a:

$$\varepsilon_d = \frac{e_d}{L_d} \quad \text{Ec. 3}$$

e_d : Deformación total.

L_d : Longitud de la diagonal.

De lo anterior, es posible expandir la ecuación a partir del esquema de la figura:

$$\varepsilon_d = \frac{e_d}{L_d} \frac{\Delta h \cos \theta}{\frac{h}{\sin \theta}} = \frac{\Delta h \cos \theta \sin \theta}{h} \quad \text{Ec. 4}$$

Se desprecia la deformación longitudinal en el elemento diagonal a causa de la rotación y a la aproximación de la deformación transversal de cortante como:

$$\gamma = \frac{\Delta h}{h} \quad \text{Ec. 5}$$

Se obtiene la siguiente aproximación para la deformación por cargas axiales:

$$\varepsilon_d = \gamma \cos \theta \sin \theta = \frac{\gamma \sin 2\theta}{2} \quad \text{Ec. 6}$$

Por último, la combinación de las ecuaciones anteriores, se obtiene la expresión para la fuerza cortante:

$$V = \gamma(A_d E_d \sin 2\theta \cos \theta) \quad \text{Ec. 7}$$

Por definición, la rigidez transversal de corte relaciona la fuerza de corte y la tensión de corte:

$$V = D_T \gamma \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

$$D_T = A_d E_d \sin 2\theta \cos \theta \quad \text{Ec. 9}$$

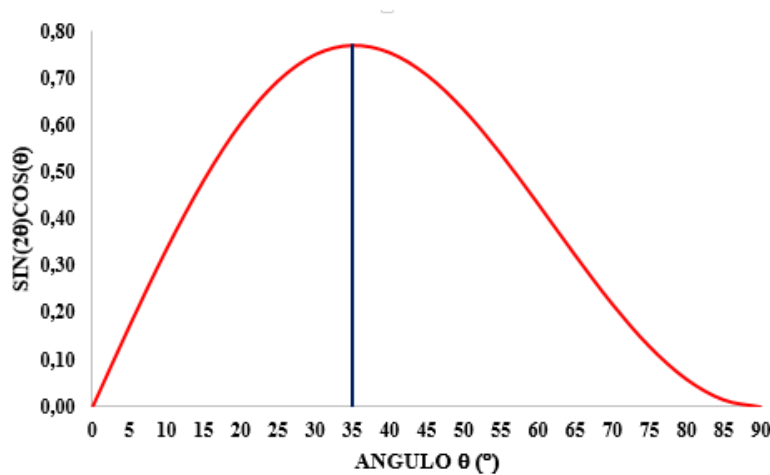


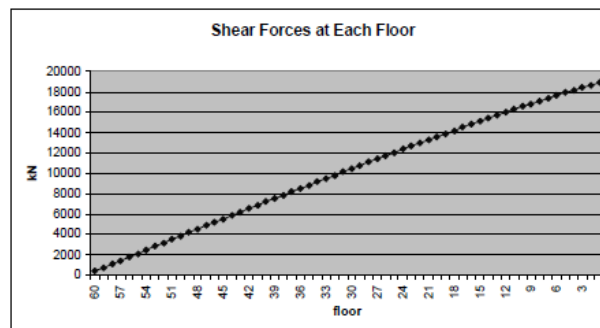
Figura 16. Ángulo óptimo para máxima rigidez al corte. (Moon, Connor y Fernández, 2007)

La gráfica de la Fig. 16, se puede observar que el ángulo óptimo para resistir la máxima fuerza cortante es de 35°. Por otra parte, se conoce que en los marcos arriostrados el momento flector es llevado por las fuerzas axiales en las columnas, como resultado el ángulo adecuado para elementos verticales para la máxima rigidez a la flexión es de 90°. Por ende, el ángulo óptimo que se espera en un sistema Diagrid varíe entre los 35° y 90°.

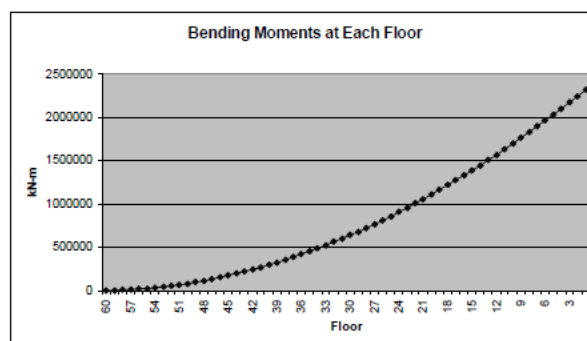
De acuerdo con Moon (2007), se puede deducir que dependiendo de la altura del edificio varía el ángulo óptimo. Moon, Connor y Fernández (2007) modelaron tres estructuras de 60, 42 y 20 pisos con diferentes ángulos contenidos en el rango anteriormente mencionado. Para cada

modelo se determinó la deriva en el último piso con el objeto de encontrar el ángulo óptimo, de esta manera obteniendo los siguientes resultados: ángulo óptimo de 69° , 63° y 53° , respectivamente.

7.2.2 Variación de ángulo óptimo. Investigaciones realizadas por Moon, Zhang, Zhao y Liu; proponen sistemas estructurales Diagrid que cambian gradualmente el ángulo óptimo de las diagonales; una solución mucho más eficiente con respecto a configuraciones de ángulo uniforme; el motivo está relacionado a la flexión y la rigidez al corte varían en toda la elevación, es decir, los momentos aumenta hacia la base, por lo tanto, el diseño a flexión gobierna en una zona inferior de la estructura, por lo contrario el fuerza cortante aumenta en la zona superior de la estructura (*Fig. 17*).



(a)



(b)

Figura 17. Gráficos de un edificio de 60 pisos (a) Fuerza de corte (b) Momento flector. (Moon, 2008)

Dado que el ángulo del módulo afecta fuertemente tanto la flexión como la rigidez al corte de la estructura en diagonal, es probable que las estructuras en diagonal sea más eficientes (es decir, las soluciones que exhiben la máxima relación rigidez / peso) se caractericen por configuraciones de ángulo variable.(Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014).

7.3 Configuración del núcleo

Como se dijo anteriormente, el núcleo puede estar diseñado para transportar cargas gravitacionales. Lo más convencional de estos núcleos es que sólo contribuyen del 15% al 20% de la rigidez lateral de una estructura Diagrid. (Moon, Connor y Fernández, 2007). También cabe resaltar que un sistema Diagrid puro no requiere de un núcleo; esto es basado en los diseños de Shukhov que hacen uso exclusivamente en el acero para resistir todas las cargas (Boake, 2016).

En esta parte de la estructura, es donde se encuentran los pocos elementos verticales que integran el sistema Diagrid, soportando parte de las cargas de la losa de entrepiso. En general, las vigas perimetrales que conforman la placa de entrepiso, se apoyan a las columnas de núcleo y al exoesqueleto, con la finalidad de garantizar la transferencia de cargas en el sistema.



Figura 18. Núcleo arriostrado del edificio Swiss Re´s. (León y Moreno, 2014)

Con respecto al área del núcleo, corresponde a un 25% aproximado del área total en planta de una edificación y se puede construir en acero (*Fig. 18*) o concreto como muestran las *Fig. 19* y *20*.



Figura 19. Núcleo en concreto (Capital Gate). Tomado de <https://www.e-architect.co.uk/dubai/capital-gate-abu-dhabi>.



Figura 20. Núcleo en concreto Canton Tower. Tomado de http://www.solaripedia.com/13/342/4264/canton_tower_in_itial_construction.html.

La distribución de esta planta se puede adaptar a diferentes tipologías, como las mostradas en la *Fig. 21*.

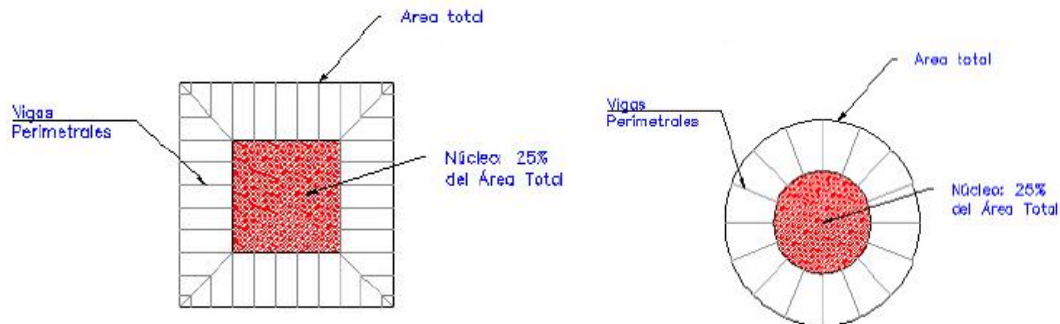


Figura 21. Tipología de una planta cuadrada y circular. (León y Moreno, 2014)

7.4 Distribución de cargas

Según Khushbu y Paresh (2013), muestra la distribución de las cargas de un edificio de 36 pisos modelado en ETABS (CSI, 2013) obteniendo los siguientes resultados: La carga total gravitacional de la estructura se distribuye en un 51,62% en la Diagrid y un 48,38% en el núcleo. Mientras que la carga lateral se distribuye en un 97,68% y 2,31%, en el exoesqueleto y el núcleo respectivamente, como se muestra en la *Fig. 22*.

Tabla 1.

Distribución de carga gravitacional y lateral en un sistema Diagrid de 36 pisos

Loading	Total load on diagrid system (kN)	Loading on perimeter diagonals (kN)	Loading on internal columns (kN)
Gravity loading	3,51,264.24	1,81,332.12	1,69,932.12
Lateral loading	3227.60	3152.92	74.68

Fuente: (Khushbu y Paresh, 2013)

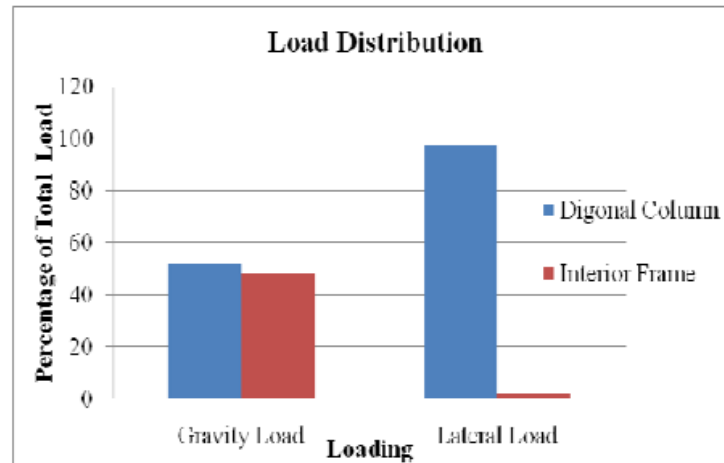


Figura 22. Distribución de carga en un sistema Diagrid. (Khushbu y Paresh, 2013)

Por lo tanto se puede observar que el núcleo es principalmente resistente a cargas gravitacionales y no tiene contribución en las carga laterales, como se mencionó anteriormente se puede estimar que la rigidez lateral se asigna al sistema Diagrid.

8. Generación geométrica de una estructura Diagrid

Uno de los desafíos que se les presentan a los ingenieros estructurales para desarrollar el marco estructural son las formas irregulares que tienen los edificios por planteamiento arquitectónico, que a su vez pueden traer ventajas en los efectos de la carga lateral. Desde un criterio estructural, la implementación de un sistema que concentra la carga lateral en el perímetro es bastante deseable, ya que aumenta su resistencia estructura ante cargas laterales (Mirniazmandan, Alaghmandan, Barazande y Rahimianzarif, 2018). Dicho de esta manera, una de las soluciones más adecuadas es la implementación del sistema Diagrid.

Sin embargo, los estudios que se han realizado sobre el diseño de este tipo de sistema, sólo han contemplado tipologías cuadradas en planta y elementos no extruidos. También la falta de integración entre la arquitectura y el diseño estructural de edificios han imposibilitado un incremento en el uso del sistema Diagrid. Mirniazmandan, Alaghmandan, Barazande y Rahimianzarif (2018), presentan una metodología para diseño preliminar del sistema Diagrid.

Se han realizado estudios para generar la geometría de este tipo de estructuras implementando el software Rhinoceros 3D (Robert McNeel y Associates, 2012), junto con Grasshopper; un complemento que integra el programa Rhinoceros 3D y se ejecuta dentro de este. Este lenguaje de programación visual, genera una serie de modelos de construcción paramétricos con estructura Diagrid.



Figura 23. Ejemplo de modelo estructural de un sistema Diagrid. (Mirniazmandan, Alaghmandan, Barazande y Rahimianzarif, 2018)

Para una mejor modelación, Mirniazmandan, Alaghmandan, Barazande y Rahimianzarif (2018); usan como complemento una herramienta de ingeniería estructural llamada Karamba 3D; un software que proporciona un análisis de los elementos estructurales de manera más precisa y está completamente integrado al entorno de diseño de Grasshopper (Karamba 3D n.d.). Asimismo, los softwares mencionados anteriormente se han integrado a sistemas de cómputo numérico como Matlab (MathWorks, 2014), mediante programación interactiva y de esta manera exportar datos geométricos como archivos de texto (León y Moreno, 2014).

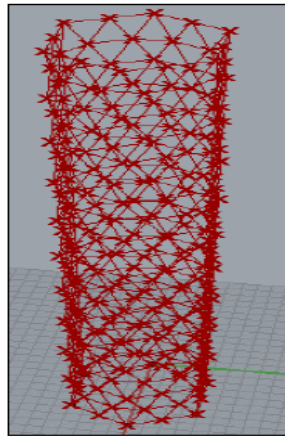


Figura 24. Geometría generada mediante el uso de Rhinoceros 3D, Grasshopper y Matlab. (León y Moreno, 2014)

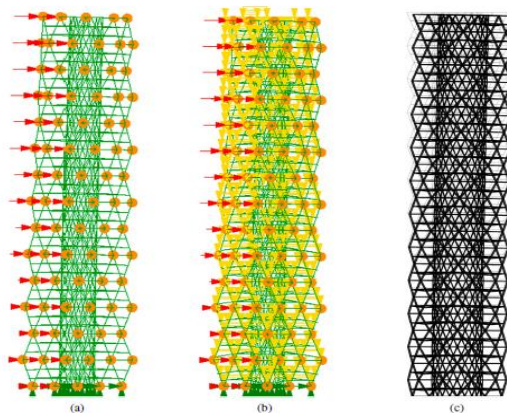


Figura 25. Ejemplo de análisis estructural usando Karamba 3D. (Mirniazmandan, Alaghmandan, Barazande y Rahimianzarif, 2018)

La *Fig. 25*, muestra el resultado de un análisis estructural empleando el software Karamba 3D, evaluando el comportamiento de cada modelo de manera individual considerando tanto cargas de viento como las gravitacionales y la deformación generada por cada una de ellas (Mirniazmandan, Alaghmandan, Barazande y Rahimianzarif, 2018).

8.1 Desarrollo de modelos estructurales implementando Grasshopper, Rhinoceros 3D y Matlab

Para representar la geometría de una estructura Diagrid, lo más importante es la tipología base de la planta. León y Moreno (2014), implementa una serie de pasos para la generación de la geometría de una estructura Diagrid los cuales cuentan con ayudas visuales de Rhinoceros 3D:

- Para definir la planta, se ingresa puntos en orden que delimiten la planta base como muestra la *Fig. 26*.

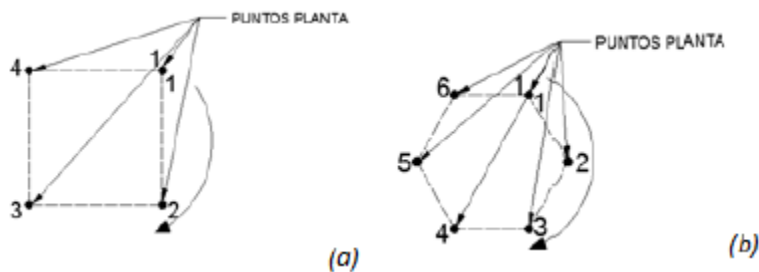


Figura 26. Ingreso de puntos de la planta base (a) Planta cuadrada (b) planta hexagonal. (León y Moreno, 2014)

- Se determina la cantidad de pisos y la altura del entrepiso del edificio para definir el módulo respectivo. Como se mencionó anteriormente, se debe saber el ángulo óptimo para definir la estructura Diagrid.

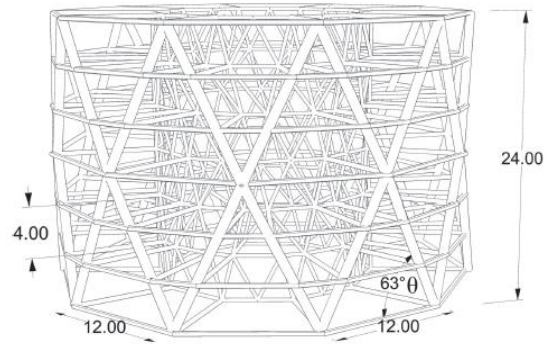


Figura 27. Ejemplo de un módulo de 6 pisos con ángulo óptimo de 63° . (Mirniazmandan, Alaghmandan, Barazande y Rahimianzarif, 2018)

- Una vez se tiene la información anterior, se extrae de Grasshopper como archivo texto y se importa Matlab. León y Moreno (2014), desarrollaron un código que ayuda calcular la separación entre los puntos de la planta base de tal forma que cumpla con el ángulo óptimo y calcula la longitud de cada cara y crea un vector donde se encuentran las coordenada X y Y de los puntos de la planta. Posteriormente, se ejecuta el algoritmo que sirve para unir los puntos mediante líneas, de manera que se definen los elementos diagonales como se observa en la Fig. 28.

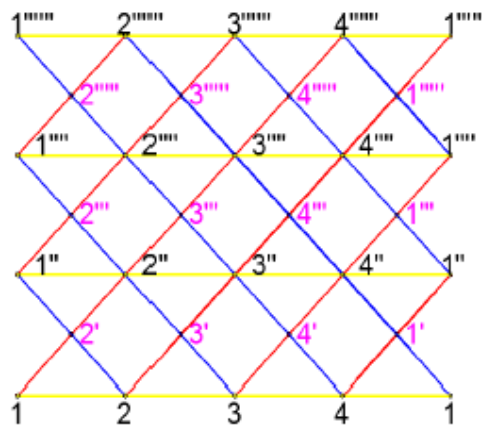


Figura 28. Esquema de conectividad. (León y Moreno, 2014)

• Una vez obtenido los vectores mediante Matlab y ser importados a Grasshopper, los elementos diagonales pasan a formar parte de un modelo del software Rhinoceros 3D, sin embargo, se hace necesario usar un programa de diseño y análisis estructural para complementar como lo es SAP2000 (CSI, 2014) o ETABS (CSI, 2013). Para resumir, la *Fig. 29*, se puede observar los pasos generales para el desarrollo del modelo de una estructura Diagrid.

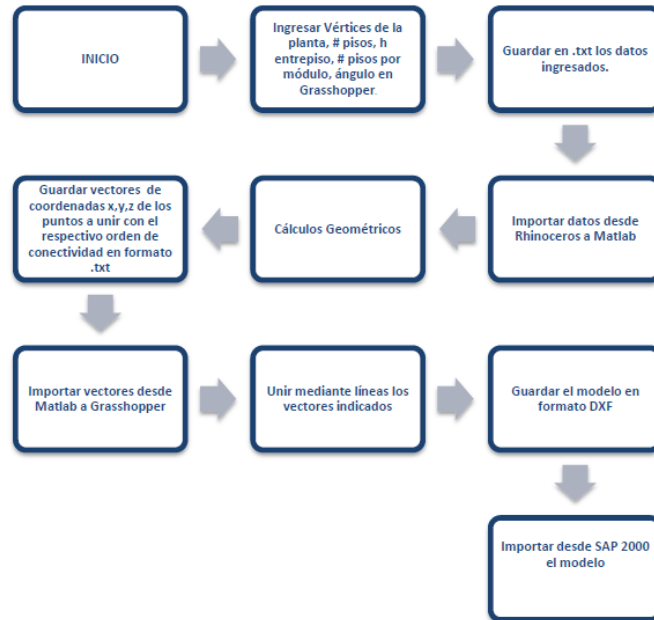


Figura 29. Estructura básica para la generación automática de la geometría de la estructura Diagrid. (León y Moreno, 2014)

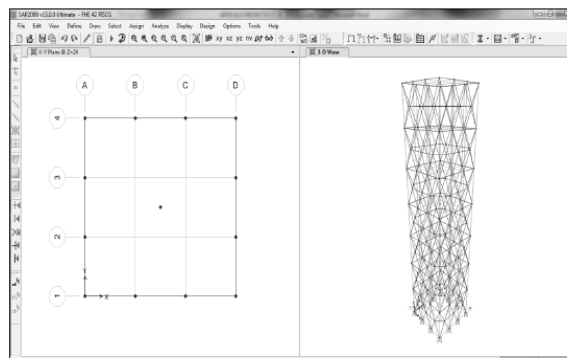


Figura 30. Geometría del sistema Diagrid en SAP2000. (León y Moreno, 2014)

9. Metodologías de pre-dimensionamiento de las diagonales

En la presente sección, se muestra la metodología usada por Moon (2007 y 2008) para el pre-dimensionamiento de los elementos de la estructura Diagrid para edificios de gran altura basada en rigidez. Esta metodología utiliza como base el sistema tubular arriostrado y partiendo de éste, se derivan las ecuaciones, con la excepción de que se suprimen los elementos verticales.

Moon, Connor y Fernández (2007), aplica este procedimiento a diferentes estructuras Diagrid variando su altura y su relación de aspecto, teniendo como resultado guías empíricas que evalúan la contribución de la deformación por flexión y corte al desplazamiento lateral en este tipo de estructuras.

9.1 Pre-dimensionamiento de los elementos diagonales con ángulo óptimo uniforme

Se modela la estructura como una viga vertical en voladizo; subdividiéndola longitudinalmente en módulos. Los módulos están definidos por cada nivel de Diagrid que se extiende en n número de pisos como se muestra en la *Fig. 27*. Dependiendo de la dirección de la carga lateral, las caras actúan como Web o Flange, siendo la primera paralela a la dirección de la fuerza lateral y el segundo perpendicular como se ilustra en la *Fig. 31*. Teniendo esta idealización, el método se reduce en determinar el área de la sección transversal de los elementos.

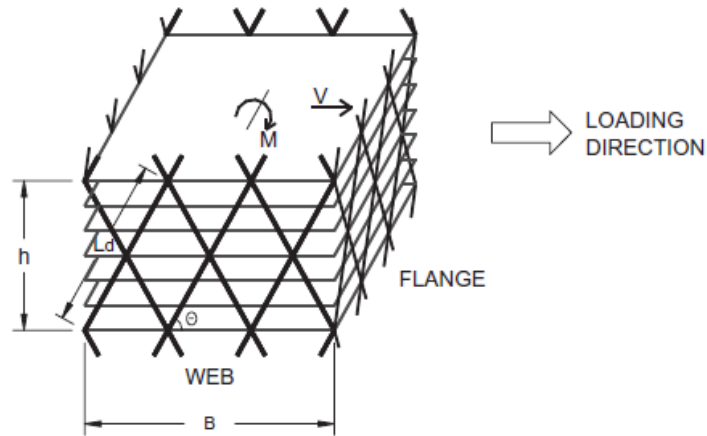


Figura 31. Módulo de una estructura Diagrid de 6 pisos. (Moon, Connor y Fernández, 2007)

9.2 Diseño óptimo basado en rigidez

9.2.1 Rigidez al corte y flexión de la estructura Diagrid. En esta metodología la fuerza cortante y el momento flector, pueden expresarse en términos de desplazamiento y rotación en cada módulo como:

$$V = K_T \Delta u \quad \text{Ec. 10}$$

$$M = K_B \Delta \beta \quad \text{Ec. 11}$$

Las medidas de movimiento están relacionadas con el corte y la deformación de flexión por:

$$\Delta u = \gamma h \quad \text{Ec. 12}$$

$$\Delta \beta = \chi h \quad \text{Ec. 13}$$

h : Altura del módulo

χ : Curvatura

Aplicando lo descrito anteriormente, esto conduce a las siguientes expresiones para la rigidez del módulo:

$$K_T = 2N_w \left(\frac{A_{d,w}E}{L_d} * (\cos \theta)^2 \right) \quad \text{Ec. 14}$$

$$K_B = N_f \left(\frac{B^2 A_{d,f}E}{2L_d} * (\sin \theta)^2 \right) \quad \text{Ec. 15}$$

N_w : Número de diagonales en el plano Web.

N_f : Número de diagonales en el plano Flange.

Se determinar la rigidez:

$$K_T = \frac{V}{\gamma h} \quad \text{Ec. 16}$$

$$K_B = \frac{M}{\chi h} \quad \text{Ec. 17}$$

Reemplazando los términos de rigidez, se puede obtener las expresiones para calcular las áreas de la sección transversal de los elementos de sistema Diagrid:

$$A_{d,w} = \frac{VL_d}{2N_w E_d h \gamma^* (\cos \theta)^2} \quad \text{Ec. 18}$$

$$A_{d,f} = \frac{2ML_d}{N_f B^2 E_d h \chi^* (\sin \theta)^2} \quad \text{Ec. 19}$$

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

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

V : Fuerza cortante

M : Momento

L_d : Longitud de la diagonal

E_d : Módulo de elasticidad del acero

θ : Ángulo de la diagonal.

γ^* : Deformación por cortante deseada.

χ^* : Deformación por momento deseada.

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

9.2.2 Desplazamiento y deformaciones por cortante y flexión. El diseño óptimo basado en rigidez corresponde a un estado de corte y deformación a flexión y ser una modelada como viga en voladizo empotrada al suelo; puede lograr una deformación uniforme para estas estructuras. Por lo tanto, se puede determinar el desplazamiento en la parte superior que está dado por:

$$u(H) = \gamma^* H + \frac{\chi^* H^2}{2} \quad \text{Ec. 20}$$

Donde la expresión $\gamma^* H$ es la contribución de la deformación al corte y $\frac{\chi^* H^2}{2}$ es la contribución a la flexión (Moon, 2008).

Posteriormente, para especificar la contribución de las deformaciones, se introduce un factor adimensional s que relaciona el desplazamiento en la parte superior de la estructura debido al momento y cortante.

$$s = \frac{\frac{\chi^* H^2}{2}}{\gamma^* H} = \frac{H \chi^*}{2 \gamma^*} \quad \text{Ec. 21}$$

Moon, Connor y Fernández (2007), proponen un valor óptimo del factor s que está dado por:

$$s = \frac{H}{B} - 3 \quad \text{Ec. 22}$$

La Ec. 22 aplica para una relación de:

$$\frac{H}{B} \geq 5 \text{ y } 60^\circ \leq \theta \leq 70^\circ$$

Uno de los parámetros más importantes con respecto diseño basado por rigidez, se puede expresar como una fracción de la altura del edificio (Moon, 2008):

$$u(H) = \frac{H}{\alpha} \quad \text{Ec. 23}$$

Esta expresión es el desplazamiento máximo permitido de la estructura donde α es un valor que define el ingeniero. Por lo general α toma el valor de 500. Por ejemplo The Aon Center, John Hancock Center y Sears Tower; el valor de α fue 400, 500 y 550 respectivamente (Moon, 2008).

La Ec. 23 es igual a la Ec. 24:

$$u(H) = (1 + s)\gamma^*H \quad \text{Ec. 24}$$

La relación de los desplazamientos controlados por la deriva, se obtiene valores de deformaciones por cortante y flexión como se indica a continuación:

$$\gamma^* = \frac{1}{(1+s)\alpha} \quad \text{Ec. 25}$$

De igual manera χ^* , se determina con la ecuación

$$\chi^* = \frac{2s}{H(1+s)\alpha} \quad \text{Ec. 26}$$

9.2.3 Definición alternativa del factor s. Montouri, Mele y Luca (2014), proponen una alternativa del cálculo del parámetro s; haciendo referencia a las teorías de vigas de Euler - Bernoulli y Timoshenko (1744 y 1922), los desplazamientos debido al corte y flexión, están respectivamente dados por:

$$u_x = \frac{wH^4}{8EI} \quad \text{Ec. 27}$$

$$u_y = \frac{wH^2}{2GA_S} \quad \text{Ec. 28}$$

Donde:

G : Módulo de cortante del material

El parámetro s se puede definir como relación de los desplazamientos en otros términos

$$s = \frac{u_x}{u_y} = \frac{GA_S H^2}{4EI} \quad \text{Ec. 29}$$

Si suponemos que las fuerzas cortantes solo actúan por las diagonales en el plano Web y los momentos en el Flange es factible escribir:

$$A_S = 2n_w A_{d,w} \cos \theta \quad \text{Ec. 30}$$

$$I = n_f A_{d,f} \sin \theta L^2 \quad \text{Ec. 31}$$

Sustituyendo los termino A_S e I en la Ec. 29 se obtiene que:

$$s = \frac{G n_w A_{d,w} \cos \theta H^2}{2E n_f A_{d,f} \sin \theta L^2} \quad \text{Ec. 32}$$

Considerando que la tipología de la planta es cuadrada, dicho de otra manera:

$$n_w A_{d,w} = n_f A_{d,f}$$

La ecuación del factor s se reescribe de la siguiente forma

$$s = \frac{G \cos \theta H^2}{2E \sin \theta L^2} \quad \text{Ec. 33}$$

Conociendo que la relación entre el módulo de corte y de elasticidad en un material como el acero tiene el valor de 0,38 y el coeficiente de poisson es de 0,30; de tal forma que el valor de s está dado por

$$s = \frac{0,19}{\tan \theta} \left(\frac{H}{L} \right)^2 \quad \text{Ec. 34}$$

Esta ecuación proporciona los valores del factor s como función de la esbeltez y ángulo de la diagonal, por el contrario la ecuación determinada por Moon, Connor y Fernández (2007), sólo

depende la esbeltez de la construcción. Con base en esto la Fig. 32 compara los valores de s de la ecuación de Moon (2007 y 2008) y la determinada por Montouri (2014).

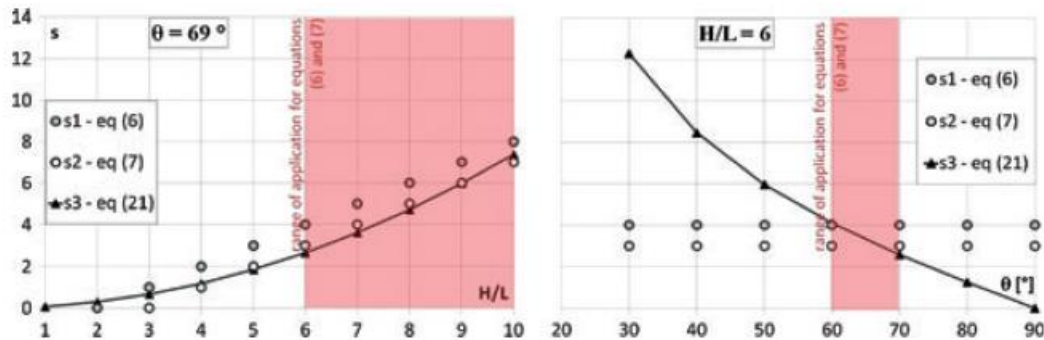


Figura 32. (a) Factor s vs Relación de aspecto del edificio con $\theta = 69^\circ$; (b) Factor S vs Angulo diagonal con relación H/L=6. (Montori, Mele, Brandonisio y Luca, 2014)

9.3 Pre-dimensionamiento de los elementos diagonales con ángulo óptimo variable

Liu y Ma (2017), plantean una configuración geométrica a partir de la generación de patrones por medio de un par de ángulos, que son la parte primordial para que la solución sea más eficiente:

$$\theta_{2OPT} = \tan^{-1} \left(\frac{H/L}{1 + 0,475 \sqrt{\frac{H}{L}}} \right) \tag{Ec. 35}$$

$$\theta_{1OPT} = \theta_{2OPT} \quad \text{Si} \quad H/L \leq 3,50$$

$$\theta_{1OPT} = \frac{1}{\left(1 + \ln \frac{H}{3,50}\right)^2} * \left(\theta_{2OPT} - \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{3}} \right) + \sin^{-1} \frac{1}{\sqrt{3}} \tag{Ec. 36}$$

$$\text{Si} \quad H/L > 3,50$$

Donde:

θ_{1OPT} : Ángulo óptimo superior

θ_{2OPT} : Ángulo óptimo inferior

Justo después que se definen los ángulos, se halla el área de las secciones de los miembros diagonales que integran la estructura, al igual que las ecuaciones planteadas para ángulo uniforme; estas expresiones matemáticas, también están basadas en requisitos de rigidez:

$$A_{d,i,w} = \frac{V_i}{2E\gamma_i \sum_{k=1}^{n_{wi}} (\sin \theta_k \cos^2 \theta_k)} \quad \text{Ec. 37}$$

$$A_{d,f} = \frac{M_i}{EL^2 \chi_i \sum_{k=1}^{n_{fi}} (\sin^3 \theta_k + \delta)} \quad \text{Ec. 38}$$

Donde:

i : Subíndice que se refiere al i -ésimo piso.

γ_i : Esfuerzo de corte de i -ésimo piso

χ_i : Es la curvatura de i -ésimo piso debido al momento

δ : Contribución de las diagonales en la cara Web.

10. Sistema de arriostramiento secundario (Secondary Bracing System – SBS)

La necesidad de usar un sistema adicional de refuerzo en edificios Diagrid no ha sido muy estudiados hasta el momento. Algunos autores han observado que a pesar de que el sistema Diagrid proporciona rigidez ante cargas laterales, manifiesta grandes desviaciones entre los pisos que componen cada módulo, es decir, ángulos pronunciados que conllevan a tener módulos más altos y elementos más flexibles (Montori, Mele, Brandonisi Giuseppe y Luca, 2014).

Cuando el sistema presenta módulos muy altos, los elementos que componen el módulo o panel son conocidos como mega-diagonales; su comportamiento estructural se podría asemejar como un truss vertical, ubicado a varios pisos de distancia (Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014). La *Fig. 33a* presenta un bosquejo típico de un sistema Diagrid, con un módulo de 6 pisos. Los niveles que presenta un asterisco, no tiene restricción lateral, es decir, si las diagonales son continuas a la altura del módulo, estos niveles derivarían un cierto grado de rigidez lateral (Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014).

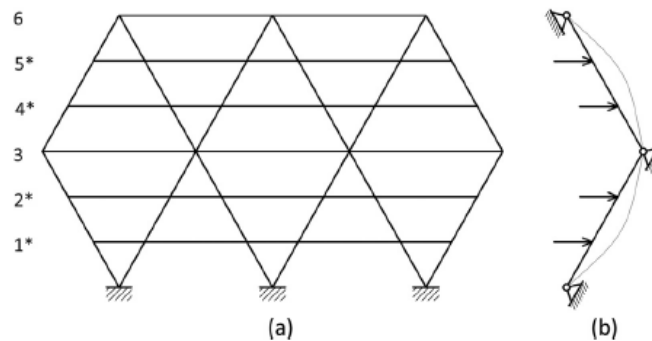


Figura 33. (a) Diagrama estático de un sistema Diagrid Típico (b) Diagrama estático unas diagonales entre puntos de panel. (Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014)

Como consecuencia de este comportamiento, el sistema global que garantiza la rigidez y resistencia bajo cargas laterales no puede responder la estabilidad lateral de las columnas interiores. El segundo problema se debe a las deformaciones a flexión de las diagonales, como consecuencia hay un aumento de los desplazamientos dentro de cada módulo y causar problemas de servicio en la estructura. Estos problemas están relacionados a la flexibilidad lateral local de la estructura (Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014).

Las soluciones que se plantea consiste en:

- Restringir lateralmente los pisos intermedios y con base en esto diseñar las columnas gravitacionales (interiores) teniendo en cuenta la carga lateral, no obstante este enfoque tiene a influir en la secciones de la diagonales, en otra palabras elementos muy robustos.
- Agregar elementos de arriostramiento locales dentro de cada módulo *Fig. 34*, pero esta solución tiene el problema de relacionarse con la estética del edificio, por lo tanto, es necesario tomar una decisión compartida con el arquitecto y tiene complicaciones en la construcción.
- Adicionar un sistema de arriostramiento secundario, que contemple una doble función:
 - ✓ Estabilizar las columnas de gravedad en niveles intermedios.
 - ✓ Transferir las cargas horizontales en los niveles intermedios a los nodos del Diagrid, separando la participación del comportamiento de flexión diagonal.

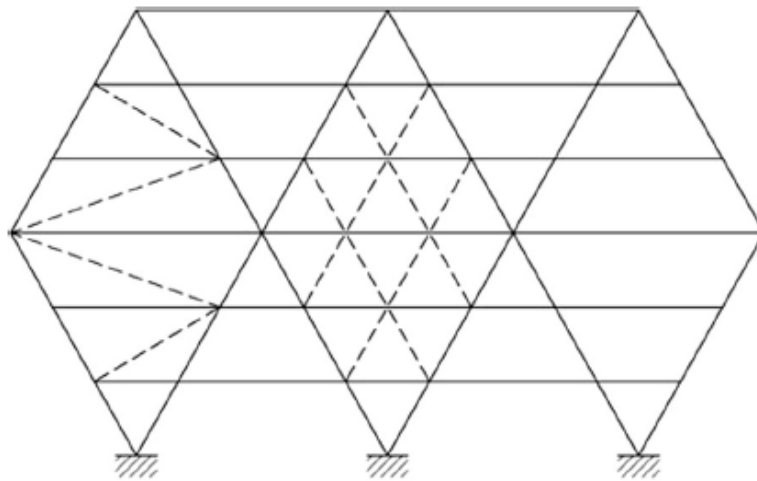


Figura 34. Esquema de los arriostramientos dentro de los módulos. (Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014)

Al usar un sistema de arriostramiento secundario (SBS, por sus siglas en inglés), se puede limitar las deformaciones locales y así evitar problemas de servicio, sin necesidad de afectar el

comportamiento global bajo cargas laterales. Esta añadidura, también permite la transferencia de las fuerzas horizontales a los nodos de la Diagrid por medio de rigidez axial de los elementos que componen el SBS. Por último, ayuda a estabilizar las columnas interiores que componen el núcleo en los pisos intermedio.

10.1 Necesidad de SBS

Para determinar si un módulo de Diagrid necesita SBS, es importante cuantificar la rigidez que contribuye el elemento diagonal al módulo (Boake, 2016).

Según Montori, Mele, Brandonisi y Luca (2014), el resultado que proporciona el refuerzo de la diagonales a las columnas interiores (gravedad), se evalúan idealizando un sistema compuesto por elementos diagonales y verticales llamado sistema apoyado; de esta forma algunas columnas dependen de la estabilidad de las diagonales, es decir, los miembros están unidos entre sí, por lo tanto el pandeo debe ocurrir en todos los miembros y con el mismo desplazamiento.

Teniendo en cuenta la configuración de la *Fig. 35*, donde el elemento A representa la diagonal y B la columna interior del núcleo, solo hay dos posibles modos de pandeo:

- El modo de balanceo global (piso múltiple).
- El modo de sin balanceo local (piso único).

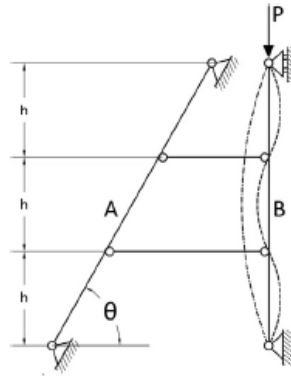


Figura 35. Configuración de apoyo de las diagonales (A) y columnas de gravedad del núcleo (B).
(Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014)

“La capacidad de pandeo del sistema asociado a cada modo se puede calcular teniendo en cuenta las capacidades de los elementos estructurales (elementos apoyados y arriostrados) involucrados en el modo” (Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014).

Si A es un elemento muy delgado, su aporte al sistema no es suficiente, el pandeo se asocia a un modo balanceado y que se representa como una línea de una sola curva ver Fig. 35; la carga de pandeo viene dada por en la siguiente ecuación:

$$P_{cr,col,S} = \frac{\pi^2 * E * n_{col} * I_{col}}{(kh)^2} \quad \text{Ec. 39}$$

Donde:

$P_{cr,col,S}$: Carga de pandeo

E : Módulo de elasticidad del acero.

I_{col} : Momento mínimo de inercia de la columna

k : Número de pisos entre dos pisos del panel

h : Altura de entrepiso

n_{col} : Número de columnas sobre k pisos.

Si A es un elemento que no es delgado, no es despreciable su modo de balanceo; por consiguiente, la capacidad de pandeo aumenta en el sistema y está dada por:

$$P_{cr,dg} = \frac{\pi^2 * E * (I_{zz} * n_{d,w} + I_{yy} * n_{d,f})}{(kh)^2 \sin \theta} \quad \text{Ec. 40}$$

Donde:

$n_{d,w}, n_{d,f}$: Número de diagonales en Web y Flange.

I_{zz}, I_{yy} : Momentos de inercia de las diagonales

θ : Ángulo de la diagonal

En consecuencia, la carga de pandeo del sistema de apoyo está dada por:

$$P_{b,S} = \frac{\pi^2 * E * n_{col} * I_{col}}{(kh)^2} + \frac{\pi^2 * E * (I_{zz} * n_{d,w} + I_{yy} * n_{d,f})}{(kh)^2 \sin \theta} \quad \text{Ec. 41}$$

Si el pandeo se controla en modo sin balanceo, como se muestra en la *Fig. 35* y A es un elemento suficientemente rígido; la capacidad del pandeo es igual a:

$$P_{b,NS} = P_{cr,col,S} = \frac{\pi^2 * E * n_{col} * I_{col}}{h^2} \quad \text{Ec. 42}$$

Teniendo en cuenta el modo de pandeo de la Ec. 41 y sabiendo que esta es mayor a la Ec. 42 y que esto solo sucede si el sistema es suficientemente rígido; esta declaración puede cuantificarse igualando los dos términos es decir:

$$P_{b,S} = P_{b,NS}$$

$$\frac{\pi^2 * E * n_{col} * I_{col}}{(kh)^2} + \frac{\pi^2 * E * (I_{zz} * n_{d,w} + I_{yy} * n_{d,f})}{(kh)^2 \sin \theta} = \frac{\pi^2 * E * n_{col} * I_{col}}{h^2} \quad \text{Ec. 43}$$

Si se asumen secciones cuadradas en las diagonales, es decir

$$I_{dg} = I_{zz} = I_{yy}$$

$$n_{dg} = n_{d,w} + n_{d,f} \quad \text{Ec. 44}$$

Se puede establecer la condición de pandeo sin balanceo:

$$n_{dg} I_{dg} > (k^2 - 1) \sin \theta n_{col} I_{col} \quad \text{Ec. 45}$$

De modo que si una estructura Diagrid se diseña como sistema primario para soportar cargas laterales la Ec. 45 puede usarse para determinar si el sistema necesita SBS para estabilizar las columnas internas, en otras palabras si:

$$n_{dg} I_{dg} < (k^2 - 1) \sin \theta n_{col} I_{col}$$

Las columnas en el núcleo estarían en modo balanceo y es necesario un SBS. Como verificación de procedimiento; Montori, Mele, Brandonisi y Luca (2014), realizaron un análisis de elemento finitos a tres modelos con valores k de 3, 4 y 5, respetivamente, y mostraron que la carga de pandeo balanceado $P_{b,s}$ aumenta de forma lineal con I_{dg} y las columnas del núcleo están en modo sin balanceo cuando $I_{dg} \sin \theta / I_{col} > 8, 15$ y 24 respectivamente, como se muestra en la Fig.

36.

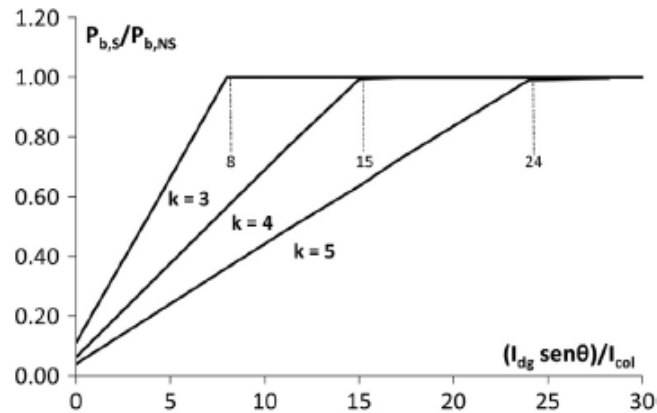


Figura 36. Relación entre la carga de pandeo de balanceo y la carga de pandeo no balanceado vs. Relación entre el momento de inercia de la diagonal y la columna. (Montori, Mele, Brandonisi y Luca, 2014)

Autores han demostrado que al usar un SBS ubicados en el núcleo son suficientes para reducir la deriva de entrepiso y con un ligero aumento de 3% del peso de la estructura y ayuda a estabilizar las columnas del núcleo.

11. Método matricial para el análisis estructural de sistemas Diagrid.

El método basado en matriz (MBM) propuesto por Lacidogna, Scaramozzino y Carpinteri (2019), resuelve los problemas estructurales de este sistema de forma automática proporcionando valores de desplazamiento y fuerzas actuantes en los elementos diagonales, diferenciándose de metodologías que tiene en cuenta solo valores de rigidez.

Para el cálculo de la MBM, se formula una relación matricial que vincula vectores de fuerzas externas y vectores de desplazamientos del piso, mediante la matriz de rigidez global. Al igual que Liu y Ma (2017), hace las mismas consideraciones las cuales son:

- Las diagonales tiene un comportamiento elástico y ellas solo actúan fuerzas axiales.
- La sección de las placas de entrepiso permanecen planas después de deformarse.
- Los niveles dentro de cada módulo están libres.

Una vez se define la hipótesis, la matriz se calcula mediante coeficientes. Cada uno de los coeficientes (k_{ij}) representa la fuerza de reacción total del piso. Al emplear la metodología en la toda la estructura, la matriz de rigidez puede calcularse en su totalidad y dado solución al sistema (Lacidogna, Scaramozzino y Carpinteri, 2019).

11.1 Análisis de sistemas Diagrid bidimensionales

Para el análisis de sistema estructural; Lacidogna, Scaramozzino y Carpinteri (2019) consideraron una estructura compuesta por M pisos y N módulos, enumerados de arriba abajo dentro de un sistema de referencia XY (*Fig. 37*). Se desprecian los pisos intermedios de los módulos, es decir solo se considera los niveles que están en los extremos de las diagonales y son los que se consideran en el análisis.

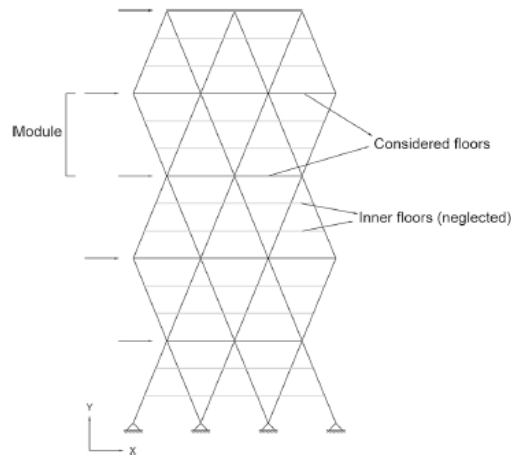


Figura 37. Sistema estructural bidimensional Diagrid. (Lacidogna, Scaramozzino y Carpinteri, 2019)

Lacidogna, Scaramozzino y Carpinteri (2019), determinaron la expresión que sirve para el cálculo de los desplazamientos de las estructuras Diagrid bidimensional, la cual es:

$$\begin{Bmatrix} \{\delta\} \\ \{\varphi\} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} [K_{F\delta}] & [K_{F\varphi}] \\ [K_{M\delta}] & [K_{M\varphi}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \{F\} \\ \{M\} \end{Bmatrix} \quad \text{Ec. 46}$$

Y conociendo la ecuación de los desplazamientos, es factible el cálculo de las fuerzas axiales en los elementos diagonales de la siguiente manera:

$$F_{diag,i} = \frac{E_{d,i}A_{d,i}}{L_{d,i}^2} * [\Delta x_{d,i}(\delta_i - \delta_{i+1}) - \Delta y_{d,i}\varphi_i(x_{d,i,i} - x_{c,1}) + \Delta y_{d,i}\varphi_{i+1}(x_{d,i,i+1} - x_{c,1+1})] \quad \text{Ec. 47}$$

Estas ecuaciones se determinaron mediante un modelo de dos grados de libertad.

11.2 Análisis de sistemas Diagrid tridimensionales

De igual manera, Lacidogna, Scaramozzino y Carpinteri (2019), consideraron un sistema tridimensional de la estructura, compuesto por N pisos, en un espacio determinado por sus ejes de referencia XYZ. Teniendo en cuenta las mismas hipótesis (Pisos continuos e infinitamente rígidos y diagonales articuladas). Para este análisis consideraron seis grados de libertad.

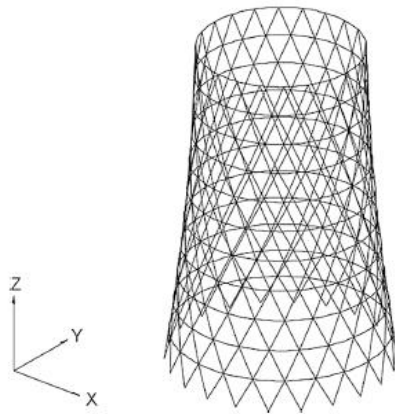


Figura 38. Sistema estructural diagrid tridimensional. (Lacidogna, Scaramozzino y Carpinteri, 2019)

Para este caso y al igual como si fuera un sistema bidimensional, es posible conocer los desplazamientos y las fuerzas axiales de las diagonales, sin embargo, es mucho más complicado por la contribución de los seis grado de libertad (Lacidogna, Scaramozzino y Carpinteri, 2019).

12. Efecto de retraso de corte en estructuras Diagrid

12.1 Efecto de retraso de corte

Este efecto, es un fenómeno mecánico que ocurre en estructuras que están constituidas por elementos tubulares y de gran altura y uno de los problemas que es necesario considerar en el diseño.

El efecto del retardo en un elemento estructura, sucede cuando bajo carga lateral el flujo del cortante es transmitida a la zona del flange a la web, generando una deformación de corte desigual en el propio plano, es decir, un tensión en la sección transversal (Shi y Zhang, 2019). Esto hace que la teoría de vigas no se cumpla; porque el efecto de retraso no estará en el plano. Por lo tanto, al suponer que la sección es plana, el efecto de retraso de corte no se producirá en una estructura Diagrid.

Al hacer esta suposición, el resultado de la distribución de la tensión es lineal en la sección del elemento y solo puede ser cierta si la rigidez cortante de la sección es finita y no hay fuerzas de corte. Si se asume que existe esta fuerza de corte, el flujo se desarrollará como se mencionó anteriormente; a causa del flujo de corte entre la web y el flange, el desplazamiento longitudinal que se presenta no es lineal y se puede observar en la *Fig. 39* (Leonard, 2008).

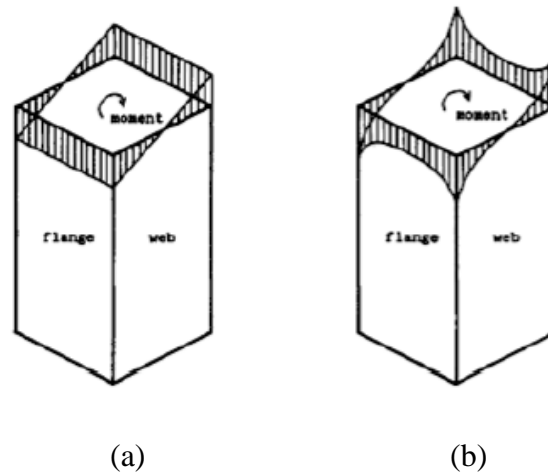


Figura 39. Distribución de tensión en la viga (a) Sin retraso de corte; (b) Con retraso de corte. (Leonard, 2008)

Leonard (2008), compilo información acerca de un fenómeno en la sección de la viga opuesta al efecto de retraso de corte. Autores como Fouch y Chang (1982), contemplaron una irregularidad en una viga en voladizo que es sometida a una carga uniformemente distribuida:

“En la región más allá de la cuarta parte de la longitud del voladizo desde el extremo fijo, el esfuerzo de flexión en la sección de la viga en las esquinas es menor que los esfuerzos en el medio del panel del flange, este efecto se conoce como retraso de corte negativo” (Leonard, 2008).

Este efecto se puede observar en la *Fig. 40*; de lo contrario se llama retraso al corte positivo.

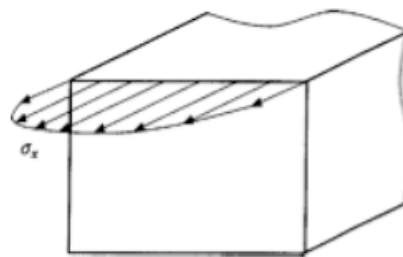


Figura 40. Retraso de corte negativo. (Leonard, 2008)

12.2 Efecto de retraso de corte para estructuras Diagrid

Como se ha mencionado en este documento, el sistema estructural Diagrid proporciona una mayor rigidez lateral con respecto a sistemas convencionales; la mayoría de estudios se han enfocado en métodos de pre-dimensionamiento, generaciones geométricas, ángulo óptimo de la diagonales, pero no ha revisado el efecto de retraso al corte; este tipo de efecto, afecta la rigidez y la distribución de tensiones en un elemento estructural. Shi y Zhang (2019), proponen un método de simplificación que considera este tipo de efecto de retraso en la estructuras Diagrid.

Pese a que Samat, Chua, Mustakim, Saad y Bakar (2018), establecieron que el efecto retraso de corte en un sistema Diagrid es menor a otros sistemas, no obstante, el efecto no se puede ignorar. Este efecto con ayuda de programas de análisis numérico pueden calcularse. Leonard (2008), analizó los efectos de retraso de corte en modelos estructurales realizados en el software SAP2000 (CSI, 2006) con diferentes ángulos y variación de la densidad las columnas. Encontró que el ángulo de los módulos del Diagrid tiene un efecto importante en este tipo de sistema; caso contrario sucede con los elementos diagonales que no proporcionan un efecto significativo sobre el retraso al corte.

13. Optimización

La Diagrid como sistema estructural ha sido una alternativa de solución para edificios de gran altura por su eficiencia estructural, dicho de otra manera, el cumplimiento de los requisitos de diseño y objetivos de rendimiento (Tomei, Maura y Mele, 2018).

La eficiencia estructural, se logra mediante procesos de optimización que se pueden realizar de manera explícita, rigurosa y a diferentes niveles. La configuración geométrica, la masa y el volumen de una estructura son el nivel más alto en el proceso de optimización; la disposición de los elementos estructurales como la geometría y la conectividad del patrón estructural, está en un nivel intermedio. Este nivel es primordial, ya que define la capacidad global de edificio (Tomei, Maura y Mele, 2018). Por último, en el nivel bajo del proceso de optimización se encuentra las propiedades geométricas de los elementos, como la forma, área e inercia de la sección del elemento. De acuerdo con Aldwaik y Adeli (2014); la metodología de optimización para edificios es reciente y abarca los últimos 20 años.

“Una revisión de la literatura indica que realizar una optimización formal puede resultar en ahorros de costos en el rango de 5 a 15%, lo que puede ser especialmente significativo en el diseño de estructuras de edificios de gran altura” (Aldwaik y Adeli, 2014).

Autores como Kim y Lee (2018) y Tomei, Moura y Mele (2018), han implementado métodos de optimización con algoritmos genético, ya sean, mono-objetivos o multi-objetivos usados para minimizar el peso de la estructuras mediante condiciones de rigidez lateral, reduciendo la respuesta sísmica en los edificios Diagrid para su seguridad estructural.

14. Diseño sísmico de estructuras Diagrid

La determinación de los factores de rendimiento sísmico para el sistema estructural Diagrid, es un área relativamente nueva en la ingeniería (Boake, 2014), ya que la mayoría de los estudios se han

enfocado en el comportamiento elástico de la Diagrid bajo cargas de viento y muy pocos estudios ha investigado el comportamiento sísmico (Sadeghi y Rofooei, 2018).

Los edificios diseñados y construidos con este sistema estructural, se encuentran en regiones de sismicidad baja o moderada sin experimentar movimientos telúricos; esta sería la razón por la cual no se ha estudiado el comportamiento sísmico de los Diagrid (Sadeghi y Rofooei, 2018), no obstante, está la excepción del Instituto de Tecnología a Manukau en Auckland, Nueva Zelanda que hace uso de la Diagrid para soportar algunas fachadas (Boake, 2014).

Estudios recientes, realizado por Baker, Besjak, Sakisian, Lee y Doo (2010), establecieron valores del factor de modificación de respuesta sísmica (R) y de sobrerresistencia (ϕ_0) del sistema Diagrid, de 3,64 y 1.5, respectivamente. El valor de R se puede ver en la *Fig. 41*. Esto resultados se obtuvieron usando la metodología del FEMA P695 en un edificio de 8 pisos y un ángulo óptimo de $63,4^\circ$ (Baker, Besjak, Sakisian, Lee y Doo, 2010).

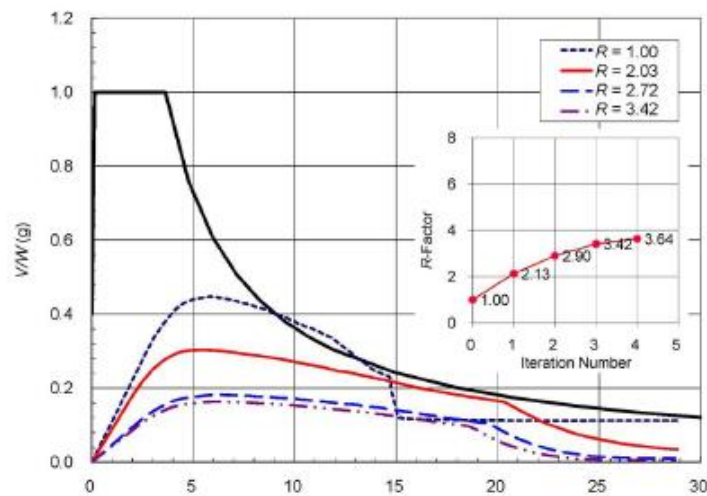


Figura 41. Estimación iterativa del factor R . (Baker, Besjak, Sakisian, Lee, y Doo, 2010)

Otros estudios realizados, mostraron que la estructuras Diagrid presentan un comportamiento frágil y presentan roturas a valores de derivas inferior al 1%, por causa de la rotulaciones plásticas (Lee, Kong, y Kim, 2018).

Últimamente, se ha tratado de entender es uso de la Diagrid como sistema estructural en áreas de alta sismicidad. Según Kim y Lee (2012), el sistema puede tener una elevada sobrerresistencia a causa de su redundancia y alta capacidad de controlar la deformación laterales ante eventos sísmicos.

14.1 Desempeño sísmico

Algunos autores, estudiaron el comportamiento sísmico de la estructuras Diagrid, cuantificando los valores de R , Ω_0 y C_d (factor de amplificación de desplazamiento), usando la metodología del FEMA P695. Esta metodología, proporciona una forma de cuantificar la respuesta inelástica y puede emplearse en sistemas nuevos.

En esta investigación, Sadeghi y Rofooei (2018), modelan dos sistemas estructurales; cada uno una cantidad de pisos (8 y 12 respectivamente) y cada modelo se proporciona diferentes ángulos en sus diagonales (45° , 63.4° y 71.5°) como ilustra en la Fig. 42.

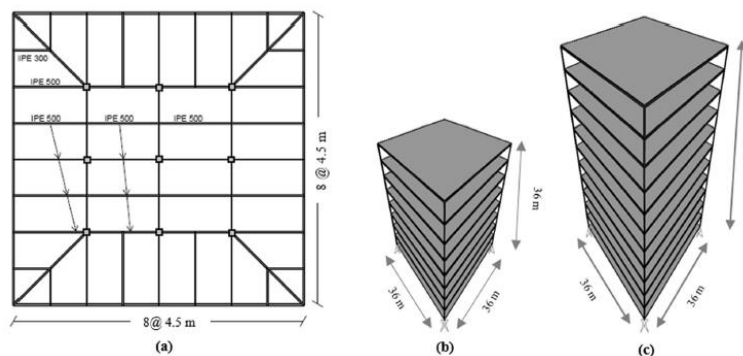


Figura 42. Modelos considerados por Sadeghi y Rofooei. (Sadeghi y Rofooei, 2018)

14.2 Factor de modificación de respuesta R

Haciendo uso de $R = 3,64$, Sadeghi y Rofooei (2018) no encontraron resultados aceptables de rendimiento aplicados en los modelos, los cuales se asumieron en zonas de alta sismicidad. Por lo tanto, para cumplir con el rendimiento sísmico, evaluaron R menores a 3,6. Por medio de iteraciones, obtuvieron valores de R que sean aceptable para el grupo de desempeño, esto se puede ver en la *Tabla 2*, donde muestra los valores R y los ángulos de los elementos.

Tabla 2.

Evaluación del desempeño sísmico de diferentes modelos de varios factores R.

Index archetype	Framing (gravity loads)	SDC	Static Ω	S_{MT} [g]	$\dot{\zeta}_{CT}$ [g]	CMR	μ_r	SSF	ACMR	Accept ACMR	Pass/fail
Performance group no. 1								$R = 1.5$			
8-Story pin_ended beams	P	D_{max}	3.04	0.89	1.22	1.37	1.85	1.17	1.92	1.52	Pass
8-Story rigid_ended beams	P	D_{max}	3.1	0.89	1.11	1.25	1.83	1.16	1.74	1.52	Pass
12-Story pin_ended beams	P	D_{max}	2.81	0.66	0.89	1.35	2.8	1.29	2.09	1.6	Pass
12-Story rigid_ended beams	P	D_{max}	2.8	0.66	0.92	1.39	3.0	1.3	2.17	1.6	Pass
Mean of performance group			2.94			1.24	2.37	1.23	1.98	1.97	Pass
Performance group no. 2								$R = 2.5$			
8-Story pin_ended beams	P	D_{max}	2.0	0.89	1.33	1.49	1.85	1.17	2.1	1.52	Pass
8-Story rigid_ended beams	P	D_{max}	2.7	0.89	1.26	1.41	3.0	1.25	2.12	1.6	Pass
12-Story pin_ended beams	P	D_{max}	3.0	0.66	0.94	1.43	2.6	1.27	2.18	1.59	Pass
12-Story rigid_ended beams	P	D_{max}	3.0	0.66	0.87	1.32	2.71	1.28	2.03	1.59	Pass
Mean of performance Group			2.67			1.41	2.54	1.24	2.11	2.0	Pass
Performance group no. 3								$R = 3$			
8-Story pin_ended beams	P	D_{max}	2.32	0.89	1.22	1.37	5.55	1.37	2.25	1.62	Pass
8-Story rigid_ended beams	P	D_{max}	2.68	0.89	1.07	1.2	4.5	1.33	1.92	1.62	Pass
12-Story pin_ended beams	P	D_{max}	2.4	0.66	0.89	1.35	3.5	1.33	2.15	1.62	Pass
12-Story rigid_ended beams	P	D_{max}	2.68	0.66	0.84	1.27	4.1	1.38	2.1	1.62	Pass
Mean of performance group			2.52			1.22	4.16	1.35	2.1	2.09	Pass

Fuente: (Sadeghi y Rofooei, 2018)

Para realizar el diseño estructural, se puede considera que para Diagrid con ángulos de 45° el valor de R es 1,50 y para ángulos de $63,4^\circ$ y $71,5^\circ$ valores de R de 2,50 y 3,00 respectivamente.

14.3 Factor de amplificación de desplazamiento C_d

De manera semejante a lo que realizaron Zhang, Zhao y Liu (2010), Sadeghi y Rofooei (2018) asumieron un valor de amortiguamiento de 2% en los modelos Diagrid, por lo tanto se determinaron valores de C_d iguales a 1,87; 3,12 y 3,75 con respecto a cada ángulo.

14.4 Factor de sobrerresistencia Ω_0

En relación a la *Tabla 2*, los valores de Ω_0 para Diagrid con ángulos diagonales de 45°, 63.4 ° y 71.5 ° son 2.94, 2.67 y 2.52, respectivamente. Sadeghi y Rofooei (2018), determinaron que el límite de sobrerresistencia es de 3,0 para el diseño del sistema de resistencia de carga lateral. Lo más significativo para el proceso de cuantificación para el sistema Diagrid, es que depende del ángulo los miembros diagonales. Factores como R y C_d tienen una tendencia creciente y Ω_0 un patrón decreciente con respecto a los ángulos.

15. Ventajas y desventajas del sistema Diagrid

Dentro de las múltiples ventajas que tiene las estructuras Diagrid frente a otros sistemas constructivos, se pueden encontrar la reducción del impacto ambiental; esto debido a que las emisiones de carbono que presentan los diferentes materiales que componen la estructura se reducen de forma significativa; cabe resaltar que también se ha hallado que al usar este sistema se

pueden conseguir ahorros de cerca del 45% en materiales de construcción (Ramírez, Teran y Montserrat, 2018).

Otro beneficio que presenta este sistema, es la capacidad de reducir los daños en la estructura. Ramírez, Terán y Monserrat (2018), llevaron a cabo un análisis para comparar el comportamiento sísmico de una estructura Diagrid y de un sistema de acero estructural resistentes momentos, determinaron que el daño que el sistema Diagrid puede sobrellevar mayores desplazamientos, presentando un 8% de daño en los miembros que lo componen; en cambio, el sistema resistente momentos desarrolla mayor nivel de daño (30%) en los elementos estructurales.

El sistema Diagrid, se puede adaptar a diferentes formas geométricas no rectilíneas, eso incluye segmentos curvilíneos y ángulos irregulares, no hay otro sistema capaz de realizar esta labor. Este sistema da mayor estabilidad debido a la triangulación de los elementos estructurales.

La eficiencia de este sistema, también ayuda a evitar las columnas interiores y de esquina, lo que permite flexibilidad con el plano de planta. El sistema perimetral de Diagrid ahorra aproximadamente el 20% del peso del acero estructural cuando se compara con una estructura convencional de momento-marco (Leonard, 2008). Otra ventaja del sistema, está en la configuración y la eficiencia del sistema, ya que se reducen el número de elementos estructurales requeridos en la fachada de los edificios, por lo tanto, menos obstrucción a la vista exterior.

Pese a que es un sistema eficiente e innovador, la complejidad en el diseño y la construcción hace que se requiera un trabajo más especializado y se hace necesario un enfoque cooperativo entre el arquitecto, el ingeniero y el fabricante.

Mientras que los sistemas convencionales de estructuras regulares están enfocadas en construcciones estándar, los edificios Diagrid presentan problemas importantes en la construcción, que deben ser anticipados en la fase de diseño, que deben tenerse en cuenta en el presupuesto del

proyecto. Una de las fases con más complejidad es la fabricación de las uniones (Boake, 2014); por lo tanto, es necesario incrementar la elaboración en taller y de esta forma disminuir las dificultades que se presenten en sitio, todo esto conlleva a un aumento de costos.

16. Conclusiones

La Diagrid se ha convertido en un sistema estructural moderno para edificios de gran altura y para aquellos que presentan geometrías complejas, proporcionando mayor rigidez lateral en comparación a los sistemas convencionales. No obstante, existe poca literatura de estudios enfocado al diseño sísmico.

Se han desarrollado métodos para la generación de geometría con diversos software para cualquier tipología en planta conservando su forma en la altura, para esto es necesario tener datos definidos como el ángulo óptimo y los parámetros de altura para definir los módulos.

El documento muestra la fase conceptual del diseño, permitiendo así desarrollar metodología para el pre-dimensionamiento de los elementos estructurales que lo componen.

Se evidencia un desarrollo de técnicas computacionales con el fin de aplicar procesos de optimización a este tipo de sistemas aplicando algoritmos genéticos mono-objetivos y multi-objetivos con fines a la reducción del peso y desplazamiento de las estructuras Diagrid, pero que es necesario profundizar más en estos estudios.

Algunos autores han explorado la posibilidad de aumentar la eficiencia del sistema Diagrid, mediante el uso de un sistema secundario que aumente la rigidez de la estructura y evite los problemas de pandeo en los elementos verticales que componen el núcleo.

Los estudios realizados por Sadeghi y Rofooei (2018), determinaron que el valor de R, dependen del ángulo de las diagonales, mejorando el desempeño sísmico de la estructura. Es decir que para edificios de 8 y 12 pisos el ángulo recomendado es de $71,5^\circ$ y con R igual a 3.

Referencias Bibliográficas

- Agkathidis, A. & Edemskaya, E. (2016). Rethinking Complexity: Vladimir Shukhov's Steel Lattice Structures. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 57, (3), 201-208.
- Aldwaik, M. & Adeli, H. (2014). Advances in optimization of highrise building structures. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 50, (6), 899-919.
- Baker, W., Besjak, C., Sakisian, M., Lee, P. & Doo, D. (2010) Proposed Methodology to Determine Seismic Performance Factors for Steel Diagrid Framed Systems, *Counc. Tall Build. Urban Habitat*.
- Boake, T. M. (2014). *Diagrid Structures : Systems, Connections, Details*, Basel: Birkhäuser.
- Boake, T. M. (2016). De-mystifying Diagrids: Expressive Structural System for Skyscrapers. *Structural Engineering International*, 26, (3), 225-234.
- English, E. C. (2005). Vladimir Shukhov and the Invention of Hyperboloid Structures, *Metropolis and Beyond: Proceedings of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium*, New York.
- Joonho, L., Jieun K., & Jinkoo K. (2018). Seismic Performance Evaluation of Steel Diagrid Buildings. *International Journal of Steel Structures*, 18, (10), 1035–1047.
- Khushbu, J. & Paresh, V. P, (2013). Analysis and Design of Diagrid Structural System for High Rise Steel Buildings. *Procedia Engineering*. 51, 92–100.

- Kim, H. & Lee, K. (2018). MOGA-Based Structural Design Method for Diagrid Structural Control System Subjected to Wind and Earthquake Loads. *International Journal of Steel Structures*, 18, (5), 1598-1606.
- Kim, J. & Lee, Y. (2012), Seismic Performance Evaluation Of Diagrid System Buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 21, (10), 736-749.
- Kinayoglu, G. & Şenyapılı, B. (2017). Circular-Planned Diagrid Systems and an Interrelated Technique Using Planar Elements. *Nexus Network Journal*. 20, (1), 215-233.
- Lacidogna, G., Scaramozzino, D., & Carpinteri, A. (2019). A Matrix-Based Method For The Structural Analysis Of Diagrid Systems. *Engineering Structures*. 193, 340-352.
- Leon, L. & Moreno, K. (2014). *Configuración Estructural Y Generación Geometría Automática De Una Estructura Diagrid*. (Trabajo de grado). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Leonard, J. (2008). *Investigation Of Shear Lag Effect In High-Rise Buildings With Diagrid System*. (Master's thesis). Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, Estados Unidos.
- Liu, C.Q. & Ma, K. (2017). Calculation Model Of The Lateral Stiffness Of High-Rise Diagrid Tube Structures Based On The Modular Method. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 26, (4).
- Mirniazmandan, A., Alaghmandan, M., Barazande, F. & Rahimianzarif, E. (2018). Mutual Effect Of Geometric Modifications And Diagrid Structure On Structural Optimization Of Tall Buildings. *Architectural Science Review*. 61, (6), 371-383.
- Montuori, G., Mele, E., Brandonisio, G. & Luca, A. (2014). Design criteria for diagrid tall buildings: Stiffness versus strength. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 23, (17).

- Montuori, G., Mele, E., Brandonisio, G. & Luca, A. (2014). Geometrical Patterns For Diagrid Buildings: Exploring Alternative Design Strategies From The Structural Point Of View. *Engineering Structures*. 71, 112–127.
- Montuori, G., Mele, E., Brandonisio, G. & Luca, A. (2014). Secondary Bracing Systems For Diagrid Structures In Tall Buildings. *Engineering Structures*. 75, 477–488.
- Moon, K. (2011). Diagrid Structures for Complex-Shaped Tall Buildings. *Advanced Materials Research*. 14, 1343-1350.
- Moon, K., Connor, J. & Fernández, J. (2007). Diagrid structural systems for tall buildings: Characteristics and methodology for preliminary design. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 16. 205 - 230.
- Moon, Kyoung. (2008). Optimal Grid Geometry of Diagrid Structures for Tall Buildings. *Architectural Science Review*. 51, (3), 239-251.
- Ramírez, A., Teran, A. & Medrano, M. (2018). Ventajas Sismorresistentes Y Ambientales Del Sistema De Rejillas Rígidas Para Zonas De Alta Sismicidad. *Revista de Ingeniería Sísmica*. 97, 64-83.
- Sadeghi, S. & Rofooei, F. (2018). Quantification of the seismic performance factors for steel diagrid structures. *Journal of Constructional Steel Research*. 146, 155-168.
- Samat, R., Chua, F., Mustakim, N., Saad, S. & Bakar, S. (2018). Lateral Displacement and Shear Lag Effect of Combination of Diagrid-Frame. *E3S Web of Conferences*.
- Shi, Q. & Zhang, F. (2019). Simplified calculation of shear lag effect for high-rise diagrid tube structure. *Journal of Building Engineering*. 22, 486-495.
- Tomei, V., Imbimbo M. & Mele, E. (2018). Optimization Of Structural Patterns For Tall Buildings: The Case Of Diagrid. *Engineering Structures*. 171. 280-297.

Zhang, Chonghou y Zhao, Feng y Liu, Yansheng. (2012). Diagrid Tube Structures Composed Of Straight Diagonals With Gradually Varying Angles. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 21, 283 - 295.