UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID

Estructuras de Retícula Triangular. Transformaciones Constructivas de las Edificaciones

Tesis Doctoral

Autor: Arquitecto Edwin González Meza

DIRECTOR: DOCTOR ARQUITECTO JESÚS ANAYA DÍAZ

2016

Tribunal nombrado por el Magfco. y Excmo. Sr. Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, el día de de 20 .

Presidente:

Vocal:

Vocal:

Vocal:

Secretario:

Suplente:

Suplente:

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día de 20 ,
en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Calificación:.....

EI PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

Me gustaría expresar mis más grandes agradecimientos a las siguientes personas:

En primer lugar a mi director de Tesis Doctoral el Doctor Arquitecto Jesús Anaya Díaz, quien se ha convertido en mi mentor al compartir sus conocimientos sin alguna queja, apoyando siempre este camino complicado con su experiencia profesional y personal, logrando obtener como resultado final esta tesis.

Al tribunal que me honra con su presencia en la Lectura de la Tesis Doctoral.

A mis lectores internacionales de tesis: Dr. Moisés Morales y el Dr. Victor Martínez de la Benemerita Universidad Autónoma de Puebla, y el Dr. José Jorge Arceo de la Universidad de las Américas Puebla, por sus comentarios y apoyo, a la Dra. Gloria Carola Santiago por sus consejos durante la estancia internacional.

A todas las personas que en España y México me han otorgado su amistad, quienes con su apoyo han ayudado a que todo el proceso de realización sea más alegre y menos complicado. Un agradecimiento especial a mi amigo Aaron López, quien no solo me ha compartido el calor de su amistad y de una familia en Madrid, también ha contribuido con su apoyo y confianza a mi consolidación personal en México y España.

Un agradecimiento a Madrid, España, por permitirme sentirme como en mi país de origen, México.

Un agradecimiento especial y con todo mi corazón a mi pareja Moira, quien con su apoyo y amor han servido como el principal motor para seguir luchando para lograr la terminación de esta investigación, sin su paciencia esto no podría ser posible.

Finalmente, y el mayor agradecimiento porque sino fuera por ellos todos los anteriores agradecimientos no serían posibles, a mis padres Jaime y Socorro y a mi hermana Cynthia, ya que su apoyo a sido el principal factor que ha permitido la realización de esta Tesis Doctoral.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	5
OBJETIVOS Y LÍMITES DE LA TESIS	8
HIPOTESIS	11
METODOLOGÍA Y FUENTES DE INVESTIGACIÓN	12
ESTADO DE LA CUESTIÓN	16
1. EL DESARROLLO DE LAS ESTRUCTURAS RETICULARES	22
1.1. La tipología de las retículas como solución del sistema estructural para el entendimiento.....	23
1.1.1. Configuración de las tipologías de retículas estructurales laminares y espaciales como factor determinante para el desarrollo de las estructuras reticulares.	26
1.1.1.1. La generación de la retícula y su influencia en el diseño de la superficie estructural.	27
1.1.1.2. Estructuras de una capa.....	27
1.1.1.3. Estructuras de doble capa y multicapa.....	33
1.1.1.4. Las mallas en las envolventes reticulares tipo bóveda cañón y cúpulas.....	36
1.1.1.5. Las retículas de las estructuras de superficies de forma libre.....	40
1.1.1.6. La transformación tipológica de la retícula triangular para la optimización de las estructuras ligeras.....	41
1.2. Los materiales como factor en el desarrollo de los sistemas estructurales utilizados en las estructuras reticulares.....	43
1.3. Nodos y sistemas reticulares modulares prefabricados.	53
1.3.1. Sistema MERO.	59
1.3.1.1. Sistema esférico MERO KK.	59
1.3.1.2. Sistema de tazón MERO NK.	61

1.3.1.3.	Sistema de cilindro MERO ZK.....	62
1.3.1.4.	Nodo de disco cilíndrico MERO TK y el sistema MERO BK. ..	63
1.3.2.	Sistema Mobilar.	65
1.3.3.	Sistema Unistrut o Moduspan.	66
1.3.4.	Sistema Octet Truss.	68
1.3.5.	Sistema Space Deck.	69
1.3.6.	Sistema SDC.....	71
1.3.7.	Sistema Oktaplatte.....	72
1.3.8.	Sistema Triodetic.	73
1.3.9.	Sistema Tridilosa.....	76
1.3.10.	Sistema Nodus.....	78
1.3.11.	Sistema Unibat.....	80
1.3.12.	Sistema Octatube y Tuball.	81
1.3.13.	Sistema Tomoe Uni-truss.....	83
1.3.14.	Sistema Geométrica.	85
1.3.15.	Otros sistemas.	87
1.4.	La forma geométrica como un factor en el desarrollo de las estructuras reticulares.....	91
1.4.1.	Los módulos poliédricos como base para la generación de las estructuras planas.....	93
1.4.2.	Clases de superficies tradicionales, las superficies de rotación y traslación como base de las estructuras bóveda cañón, cúpulas y formas complejas.....	95
1.4.3.	Las superficies de forma libre como base geométrica en la generación de las estructuras innovadoras.....	100
1.4.4.	La transformación tipológica de la forma geométrica de las estructuras reticulares triangulares.....	108

1.5.	El sistema estructural como un factor que influye en la solución final de la forma de la estructura reticular.....	111
1.5.1.	La evolución tecnológica como factor en la influencia del desarrollo de los sistemas estructurales reticulares.....	112
1.5.2.	El sistema estructural como solución de la forma y el proyecto seleccionado.	121
2.	LAS TRANSFORMACIONES DE LA RETICULA TRIANGULAR APLICADA A LA ESTRUCTURA.	128
2.1.	Contexto histórico, desarrollo de las estructuras de 1800 a 1945. La transformación de las estructuras reticulares lineares y bidimensionales a estructuras tridimensionales.	129
2.2.	Desarrollo de las estructuras espaciales y laminares reticulares de 1946-1960. El desarrollo de la tecnología y la forma, adaptada a la transformación de estructuras bidimensionales a estructuras reticulares tridimensionales.	177
2.2.1.	El valor del tubular como solución de la barra y el nodo como un recurso de las uniones que otorguen una solución de la tipología estructural prefabricada.	192
2.2.1.1.	Konrad Wachsmann (1901-1980), el desarrollo de la prefabricación y los sistemas de unión de las grandes estructuras.	193
2.2.1.2.	Max Mengerhausen (1903-1988), el desarrollo de los nodos de unión prefabricados para su comercialización.	199
2.2.1.3.	Zygmunt Stanislaw Makowski, el desarrollo de la estructura espacial como solución de la envolvente.	203
2.2.1.4.	Stéphane du Château (1908-199), el desarrollo de los nodos prefabricados como solución reticular de las estructuras ligeras.	206
2.2.2.	La retícula y los materiales como solución de una metodología de la construcción.	209

2.2.2.1.	Dome of Discovery, Londres, Inglaterra (1951).	209
2.2.2.2.	Domo para el Ford Rotunda, Michigan, Estados Unidos (1953).	219
2.2.2.3.	Anexo a la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Michigan, Estados Unidos (1954).	227
2.2.2.4.	Richard Buckminster Fuller (1895-1983), el desarrollo del domo geodésico y las estructuras tensadas.	232
2.2.2.5.	Louis Isadore Kahn (1901-1974) y Pier Luigi Nervi (1891-1979), el desarrollo del hormigón como solución estructural en las estructuras reticulares.	241
2.2.3.	La búsqueda de la forma como inicio de una ideología moderna.	250
2.2.3.1.	The Skylon.	250
2.2.3.2.	Félix James Samuely (1902-1959), el desarrollo del pretensado en estructuras metálicas).	254
2.2.3.3.	Georges Robert Le Ricolais (1894-1977), el desarrollo de la estructura ligera y la influencia de la geometría como solución de la forma.	260
2.2.3.4.	Eduardo Fernando Catalano (1917-2010), el desarrollo de la geometría y retícula como solución de las estructuras laminares. 265	
2.2.4.	Proyectos y edificaciones reticulares triangulares, 1946-1960.	269
2.3.	Desarrollo de las estructuras reticulares en altura y de grandes luces de 1960-1992. La construcción de edificios de altura; las grandes estructuras y megaestructuras; y las grandes arenas de espectáculos empleando la retícula triangular como solución estructural.	277
2.3.1.	Las grandes cubiertas usadas en estadios, palacios deportivos y edificios públicos.	279
2.3.1.1.	Palacio de los Deportes de la Ciudad de México, México.	293

2.3.1.2.	Pabellón Polideportivo, Palafolls, España.	310
2.3.1.	Las grandes estructuras y las mega-estructuras.	317
2.3.2.1.	Festival Plaza (Symbol Zone), Osaka, Japón.	335
2.3.2.	Los edificios de altura.	340
2.3.3.1.	John Hancock Center, Chicago, Estados Unidos.	347
2.3.3.	Otros proyectos e investigaciones, 1960-1992.	352
2.3.4.1.	Günter Günschel (1908-2008).....	354
2.3.4.2.	Frei Paul Otto (1925-2015).....	363
2.3.4.3.	David Georges Emmerich (1925-1996) y Keith Critchlow	367
2.3.4.4.	Emilio Pérez Piñero.	377
2.3.4.5.	Heberto Castillo Martínez (1928-1997) y Francisco Castaño Hernández.	380
2.3.4.6.	Proyectos varios, 1960-1992.....	384
2.4.	Desarrollo de las estructuras reticulares en la era digital del diseño arquitectónico de 1992 a 2003. La aplicación de la tecnología digital y nuevas tecnologías a proyectos estructurales reticulares.	393
2.4.1.	Proyecto Edén, Cornwall, Gran Bretaña.	398
2.4.2.	Otros Proyectos.	405
3.	LAS RETICULARES TRIANGULARES COMO UN MODELO TIPOLÓGICO DE LAS ESTRUCTURAS LIGERAS, DESARROLLO GEOMÉTRICO Y TECNOLÓGICO DE LAS EDIFICACIONES.....	411
3.1.	Diagrid, las cascaras de forma libre y las geometrías emergentes como la tipología estructural reticular determinante en las transformaciones de finales del siglo XX y el siglo XXI.	412
3.1.1.	El sistema Diagrid aplicado en edificios de altura optimizando su desempeño estructural de transmisión de cargas.	417
3.1.1.1.	Humana Headquarters.	424
3.1.1.2.	Swiss Re Tower.	427

3.1.1.3. Carbon Tower.....	432
3.1.2. Las cascaras y las geometrías emergentes como solución de la estructura contemporánea aplicada al futuro de la técnica de la retícula triangular del siglo XXI.	439
3.2. Presente de las estructuras de retícula triangular (2004-), el futuro de las estructuras, cubiertas y envolventes para diferentes formas y tipologías de edificaciones.	447
3.3. Transformaciones de las tipologías que influye en el desarrollo de la retícula empleada como elemento estructural.	454
3.3.1. Transformaciones de la retícula como influencia en el desarrollo de la forma para determinar la evolución geométrica de las estructuras.	454
3.3.2. Transformaciones tecnológicas de la estructura, influencia en el desarrollo de la forma.	458
3.3.3. Transformaciones tipológicas de las estructuras reticulares triangulares.....	461
4. CONCLUSIONES	468
CONCLUSIONS	475
BIBLIOGRAFÍA	480
ILUSTRACIONES.....	505

RESUMEN

Las estructuras reticulares se han desarrollado como una de las soluciones favoritas aplicadas en sistemas estructurales. Esta revolución reticular aplicada a la arquitectura, inició aproximadamente hace 200 años, posterior a la Revolución Industrial, con el desarrollo de la industrialización de los procesos de producción y que continua hasta la época actual con el desarrollo de infinitas formas nuevas, cuya capacidad de propuestas de técnicas digitales para diseño y cálculo se empiezan a desarrollar en los años 1960's. Las estructuras reticulares tienen una historia de desarrollo y evolución consolidada en los últimos 60 años donde su futuro es incierto, aunque en la actualidad es la mejor solución para desarrollar prácticamente cualquier proyecto.

El presente trabajo de investigación, muestra el proceso de transformación y las soluciones empleadas históricamente en las estructuras reticulares que utilizan el triángulo como base modular de la forma y como resultado final estructural en la última mitad del siglo XX, comprendiendo un periodo entre los años 1946 y 2003, iniciada con la finalización de la Segunda Guerra Mundial y el inicio de la posguerra, hasta la culminación de la construcción de uno de los sistemas reticulares con mayor futuro y aplicación en la actualidad como lo es el sistema Diagrid, aplicado por primera vez a una edificación de altura (Swiss Re Tower), tomando en cuenta el proceso de evolución que se llevó a cabo en años anteriores aplicada en estructuras ligeras reticulares a principios del siglo XIX.

El contexto histórico empieza a partir del siglo XIX, iniciando con la construcción del primer domo reticular fabricado de hierro en París, *The Halle au Blé*, continuando con la construcción de las edificaciones necesarias para el desarrollo de las Exposiciones Universales, que se caracterizarían por el interés de los países sede por mostrar su poder económico a países invitados, siendo el Palacio de Cristal construido para la Exposición Universal de Londres de 1851, construyéndose así la primera gran edificación construida para una exposición internacional, aplicando la prefabricación como el gran factor que caracterizaría esta construcción en conjunto con el reticulado, y donde la prefabricación haría posible el montaje en tan solo unos meses.

A finales del siglo XIX, el desarrollo reticular de las estructuras inició una nueva etapa con los diseños y construcciones del ingeniero ruso V. Shukhov, quien propuso nuevas formas para el desarrollo de estructuras ligeras con el empleo de nuevas técnicas de diseño que se convertirían en precedentes de las retículas Diagrid actuales, convirtiéndose así en el primer constructor en utilizar este sistema de reticulado.

En el siglo XX, dos acontecimientos sobresalen en el proceso de desarrollo de las estructuras reticulares ligeras, la fabricación de las primeras estructuras espaciales por Alexander Graham Bell, además de los módulos y nodos de unión prefabricados para la construcción de sus cometas y torres de observación a principios del siglo XX, y la comercialización del primer nodo de unión prefabricado por Max Mengerlinghausen en el año de 1942, llamado nodo de unión MERO.

En el año de 1946 con la culminación de la Segunda Guerra Mundial, el mundo llamado de la posguerra presentaría grandes crisis económicas y políticas que influenciarían la forma de construir alrededor del mundo, marcada por la necesidad de economizar y ahorrar el mayor número de recursos necesarios tanto para la fabricación como para la construcción, e inclusive para el mantenimiento de las edificaciones. Arquitectos, ingenieros, investigadores y autodidactas surgieron en esta época, mostrando el camino que la construcción de edificaciones requirió ante las nuevas necesidades que un mundo destruido por la guerra demanda, planteando así la generación de nuevas formas ante los avances tecnológicos.

El camino a la reconstrucción y al surgimiento de las nuevas tecnologías, iniciaría un primer periodo de desarrollo principalmente en Estados Unidos y Europa, con pensadores, diseñadores y constructores como Félix Samuely y Zygmunt S. Makowski en Gran Bretaña, Max Mengerlinghausen y Frei Otto en Alemania, Robert Le Ricolais y Stéphane du Château en Francia, Konrad Wachsmann y Richard B. Fuller en Estados Unidos entre otros, quienes muestran que el camino futuro para los siguientes 100 años en la construcción

de estructuras ligeras, es la aplicación de la retícula para la generación de sistemas estructurales espaciales y tri-direccionales.

Un segundo periodo se caracterizaría por la aplicación del sistema reticular en la construcción de las grandes estructuras, que funcionan como envolventes y soportes estructurales para las grandes edificaciones, además de la construcción de torres de altura que utilizan un sistema reticular en diagonal para optimizar el flujo de fuerzas a través de sus elementos. Al igual que en el primer periodo sobresalen en esta segunda etapa investigadores y constructores cuyos trabajos marcan el proceso de desarrollo reticular de las estructuras. Como ejemplo el arquitecto Günter Günshell de Alemania y el ingeniero Francisco Castaño de México, quienes se convertirían en precursores de la generación de las formas libres, así como el arquitecto de origen español Félix Candela, que con la construcción del Palacio de los Deportes de la Ciudad de México inicia el proceso de cambio en el empleo de varios materiales aplicados a grandes envolventes, al cambiar del hormigón a estructuras fabricadas en metal para la construcción de grandes estructuras.

En el último periodo de estudio que inicia con el diseño del Walt Disney Concert Hall, edificación que inicializa la era digital aplicada a la arquitectura, donde el diseño, fabricación y construcción de edificaciones plantearía un nuevo punto de cambio y transformación en la arquitectura, factor que influiría en el desarrollo de formas más complejas que serían posibles de construir por medio de ordenadores. Sobresale en este periodo el diseño y construcción de la primera torre utilizando el sistema Diagrid por el arquitecto inglés Norman Foster (Swiss Re tower).

Para el desarrollo y evolución de las estructuras reticulares, y las formas posibles a generar, se presentan y analizan los diversos factores que influyen para que las estructuras reticulares se conviertan en la opción favorita de arquitectos e ingenieros en la construcción de las estructuras. El pasado, presente y futuro de las estructuras de las edificaciones plantean la necesidad del entendimiento de su comportamiento histórico y evolutivo para la generación de las estructuras futuras.

También es relevante históricamente la obsesión de Konrad Wachsmann por la fabricación de un nodo universal capaz de resolver cualquier propuesta de forma y sistema estructural aplicado al diseño y construcción de edificaciones, frente a la tesis contraria que menciona Z. Makowski, afirmando que *no hay posibilidad de fabricar un nodo universal*, pero por otro lado, si hay la posibilidad de proponer al triángulo como la forma universal capaz de resolver cualquier propuesta estructural y formal.

Partiendo de esta aseveración, se plantea el tema de la presente investigación, al observar que las estructuras de retícula triangular son opciones que presentan características que tanto gustan y buscan diseñadores y constructores de la actualidad, como: rapidez, facilidad, optimización, ligereza y economía para su construcción entre otras. Concluyendo por lo tanto que la retícula triangular aplicada a estructuras ligeras se convierte en la mejor opción para proponer y concluir un proyecto de envolvente o estructura soportante, la afirmación realizada por el ingeniero Félix Samuely a mediados del siglo XX sobresale como una hipótesis que se comprueba con el desarrollo actual, se *hablará de los sistemas estructurales reticulares triangulares por los siguientes 100 años*.

ABSTRACT

The grid structures have been placed as one of the favorite solutions applied to structural systems. This reticular revolution applied to architecture began approximately 200 years ago, after the Industrial Revolution with the development of the industrialization of the production processes, and continues to the present day with the development of new infinite forms whose capacity for proposals of digital techniques for design and calculation began to develop in the 1960's. The grid structures show a history of development and evolution consolidated in the last 60 years and their future is uncertain, but at present it is the best solution to develop practically any project.

The present research shows the transformation process and the solutions used in the history of the grid structures, employing the triangle as modular base form and as final structural outcome in the latter half of the twentieth century, a period comprising between the years of 1946 and 2003, from the end of the Second World War and the beginning of the postwar, till the completion of one of the most promising grid systems and applications today as it is the diagrid system, first applied to a tall building (Swiss Re Tower), taking into account the evolution process that took place in previous years applied to light grid structures in the early nineteenth century. The historical context started from the nineteenth century onwards, beginning with the construction of the first grid dome made of iron in Paris, The Halle au Blé, continuing with the construction of the necessary buildings for the development of the Universal Exhibitions, which were characterized by the interest of the host countries to show their economic power to their guest countries, being the Crystal Palace that was build for the Universal Exhibition of 1851 in London, to become the first major building constructed for an international exhibition, using the prefabrication as the great factor that characterized this construction in conjunction with the grid, and where the prefabrication made the assembly possible in just a few months. In the late nineteenth century, the grid development of the structures started a new phase with the designs and constructions of the Russian engineer V. Shukhov, who proposed new forms for the development of lightweight structures with the employment of new design techniques that would

become precedents of the current diagrids, thus becoming the first manufacturer to use this grid system.

In the twentieth century, two events stand out in the development process of the light grid structures, the fabrication of the first space structures by Alexander Graham Bell, in addition to the modules and the prefabricated connecting nodes for the construction of his kites and observation towers in the early twentieth century, and the commercialization of the first prefabricated connecting node by Max Mengerlinghausen in 1942, called MERO connecting node.

In 1946 with the completion of the Second World War, the so called postwar world presented major economic and political crises that influenced the mode of construction around the world, marked by the need to economize and save many resources necessary for manufacture as well as construction and even for the maintenance of buildings. Architects, engineers, researchers and self-taught emerged at that time, showing the way that the construction of buildings required to new needs that a world destroyed by war demanded, thus raising the generation of new forms given the technological advances. The road to reconstruction and the appearance of the new technologies initiated a first development period mainly in the United States and Europe, with thinkers, designers and builders like Felix S. Samuely and Zygmunt Makowski in Britain, Max Mengerlinghausen and Frei Otto in Germany, Robert Le Ricolais and Stéphane du Château in France, Konrad Wachsmann and Richard B. Fuller in the United States among others, who show that the future path for the next 100 years in the construction of lightweight structures is the application of the grid for the generation of spatial structural and tri-directional systems. A second period is characterized by the application of the grid system to build large structures that function as enclosures and structural supports for large buildings, and the construction of tall towers that use a diagonal grid system to optimize the flow of forces through its elements. As with the first period, researchers and builders protrude in this second stage whose works mark the reticular development process of structures; as an example the architect Günter Günsell from Germany and the engineer Francisco Castaño from Mexico, who became precursors of the generation of free forms, as well as Spanish-born architect Felix Candela, who with the construction of the Palacio de los Deportes

in Mexico City began the process of change in the employment of different materials applied to large enclosures, by changing from the concrete structures to structures made of metal for the building of large structures.

The last period of study begins with the design of the Walt Disney Concert Hall, a building that initiated the digital age applied to architecture, where the design, manufacture and construction of buildings raised a new point of change and transformation in architecture, a factor that influenced the development of more complex shapes whose construction was possible by means of computer use. Outstanding in this period is the design and construction of the first tower using the Diagrid system by British architect Norman Foster (Swiss Re Tower). For the development and evolution of grid structures and possible shapes to create, the various factors that have an influence on the grid structures to become the favorite choice of architects and engineers in building structures, are presented and analyzed. The past, present and future of building structures suggest the need to understand their historic and evolutionary behavior for the generation of future structures. Also relevant is Konrad Wachsmann's obsession to fabricate a universal node capable of solving any given shape proposal and structural system applied to the design and construction of buildings, against the other view mentioned by Z. Makowski, claiming that there is no possibility to fabricate a universal node, but then again there is the possibility to propose the triangle as universal shape capable of solving any structural and formal proposal. Given this statement, the research topic is raised by noting that the triangular grid structures are options that present characteristics that today's designers and builders crave and are looking for, such as: speed, ease, optimization, lightness, economy and other features. Concluding therefore that the triangular grid applied to lightweight structures becomes the best option to propose and complete a project of support structure or enclosure, pointing out the statement written by the engineer Felix Samuely in the midtwentieth century, proved by the current development, that the structural triangular grid systems will be discussed for the next 100 years.

OBJETIVOS Y LÍMITES DE LA TESIS

- El objetivo general de la tesis es determinar cuales son las transformaciones arquitectónicas y estructurales de las estructuras reticulares triangulares que influyen en el desarrollo y evolución de las diferentes geometrías arquitectónicas.

Con la determinación del objetivo general se plantean 3 objetivos particulares que ayuden a dar cumplimiento del objetivo general:

- Determinar cuales son los factores que influyen en la búsqueda de las transformaciones estructurales y constructivas en una tipología reticular estructural que influyen en la determinación de las técnicas de desarrollo de las formas arquitectónicas.
- Establecer las influencias de la técnica en un contexto histórico iniciado a principios del siglo XIX y consolidándose a mediados del siglo XX sobre la arquitectura contemporánea del siglo XXI. Interpretando las soluciones constructivas, tipológicas y estructurales que con los nuevos materiales y avances tecnológicos se produjeron para la determinación de las transformaciones que influyen en la evolución de la forma, por lo que se determinarán las bases de diseño y proyectuales en las soluciones estructurales al de establecer los factores y variables que influyen en el desarrollo constructivo para la que fue diseñada la estructura reticular.
- Analizar las diferentes transformaciones e influencias en el desarrollo de la retícula triangular que determinan el desarrollo de la geometría arquitectónica que influyó el diseño hasta la proyección de las formas libres aplicadas a la arquitectura contemporánea empleando las diferentes técnicas desarrolladas a través de los años.

Dentro del proceso de la tesis se analizarán proyectos arquitectónicos y estructurales que logren determinar la importancia del empleo de las retículas triangulares además de identificar sus variables proyectuales y constructivas, que sufren estas estructuras reticulares y de entramado, para finalmente poder

estipular los valores que otorgan el empleo de las retículas en las edificaciones una vez delimitado el periodo de tiempo en el que será acotada la investigación.

La investigación se acota en el periodo de tiempo que comprende la segunda mitad del siglo XX, siendo entre el año 1946 y 2003 el periodo que la va a comprender, analizando los factores de grado sociocultural y económico que influyen en el desarrollo proyectual y constructivo de las edificaciones, y que intervienen en el desarrollo de la retícula en los diferentes proyectos realizados. Sin desestimar una breve descripción del desarrollo de las estructuras reticulares en un contexto histórico iniciado en el siglo XIX y una mención posterior al año 2003 de diferentes edificaciones que determinan la conclusión final de las geometrías complejas aplicando soluciones reticulares.

Al analizar los diferentes proyectos y edificaciones, es importante detectar los puntos de cambio en la construcción de las estructuras ligeras reticulares, tomando como base las características mencionadas por Konrad Wachsmann en su libro *The turning point of a building* al tomarlos como base en el estudio. El primer punto de cambio será ubicado principalmente en la década de los años 1950's, al darse un desarrollo de las estructuras ligeras, desde la construcción del Dome of Discovery en 1951 en Londres y la patente de la cúpula Geodésica de Richard B. Fuller por primera vez construida en 1953 en la cúpula del Ford Rotunda Dome en Michigan, Estados Unidos. El segundo punto de cambio se da a finales de los años 1960's y principios de los 1970's teniendo la torre del John Hancock como el primer tubo estructural arriostrado construido en Chicago en el año de 1968 por Skidmore, Owings & Merrill y finalmente en los años 80's iniciará un nuevo movimiento reticular con el proyecto para el concurso del Humana Headquarters de Norman Foster, donde diseña por primera vez una estructura Diagrid aplicada a edificios de altura, para posteriormente en los años 90's iniciar una revolución digital en la arquitectura, para ser por primera vez construida una torre Diagrid en el año de 1998 y terminada su construcción entre los años del 2003 y 2004 de la llamada Swiss Re Tower de Norman Foster en Londres. En cada uno de los puntos de cambio se desarrollan diferentes proyectos estructurales y tecnologías que influyen en su progreso y en la evolución de los diferentes sistemas estructurales.

Por lo que la tesis dará un estudio de las transformaciones e influencias en la aplicación de los nuevos sistemas estructurales ligeros, logrando una clasificación para su entendimiento logrando tener conclusiones sobre la evolución de las estructuras reticulares, identificando las técnicas utilizada para el desarrollo de las nuevas edificaciones.

HIPOTESIS

El diseño y construcción de las estructuras utilizadas por la arquitectura contemporánea de la segunda mitad del siglo XX, están ligadas a la implantación de nuevas tecnologías y materiales de construcción, definidas mediante retículas triangulares desarrollando estructuras ligeras de tipologías nuevas y geometrías complejas, demandando nuevas soluciones que determinan en las edificaciones la recuperación de las superficies resistentes como elementos estructurales, al sustituir la masa por elementos lineales ligeros en celosías que darán impulso a la utilización de nuevos procesos constructivos para lograr una transformación a elementos tridimensionales de retículas principalmente prefabricados y la aplicación de nuevos programas computacionales que revolucionan las técnicas de producción de la arquitectura, desarrollando finalmente ilimitadas nuevas propuestas de forma, cuyo avance permitió la construcción y desarrollo de estructuras de grandes luces y de altura, estabilizando así las geometrías complejas haciéndolas trabajar de forma simple, logrando un alto nivel de resistencia y ligereza con el empleo de módulos en forma triangular, facilitando así las bases para el diseño y construcción de las estructuras de inicio de siglo XXI.

METODOLOGÍA Y FUENTES DE INVESTIGACIÓN

Para la realización de la tesis doctoral se planteó la utilización de una metodología de investigación cualitativa que se fundamente en un proceso inductivo basándose en un enfoque de recolección de datos no estandarizado y genere una teoría a partir de los datos obtenidos y analizados.

La recolección de los datos estuvo orientada a proveer un mayor entendimiento del tema de estructuras de retícula triangular y sus significados del mismo para que en el proceso de análisis de datos se genere una base de datos escritos y/o audiovisuales, e incluso entrevistas con expertos que determinen y describan el tema de estudio para finalmente obtener un reporte de resultados de investigación en torno al análisis de las variables que determinen el valor de las transformaciones en las estructuras reticulares.

Esta metodología de investigación tuvo contemplada diferentes etapas para poder lograr solucionar y lograr los objetivos planteados durante el proceso de investigación, tomando un proceso recurrente y flexible que permitió adentrarse de mejor manera en la investigación, además de que la tarea de recolectar y analizar datos que estén presentes durante todo el proceso. Las etapas fueron:

- Plantear una idea general del objeto de estudio.
- Determinar un planteamiento tentativo de investigación con la realización preliminar de los objetivos generales y específicos, que se buscan lograr en el proceso de investigación.
- Realizar una inmersión inicial en el campo de estudio del tema de investigación que permita identificar las fuentes que aporten datos además de confirmar la factibilidad de la investigación.
- Concepción del diseño de estudio que ayude a determinar y apoyar el proceso de investigación.
- Definir un muestreo inicial de investigación que ayude a determinar el alcance final, y a confirmar o ajustar la inmersión inicial.

- Realizar una recolección de datos escritos y/o audiovisuales además de entrevistas con expertos en el tema.
- Realizar un análisis de datos que permita la depuración de la información.
- Interpretar los datos obtenidos que ayude al entendimiento de los mismos.
- Elaborar un reporte final de los resultados que permita la elaboración de conclusiones finales.
- Concluir con la elaboración final de la tesis

Al aplicar esta metodología se buscó proporcionar profundidad a los datos, dispersión, riqueza interpretativa y una contextualización del entorno, donde la investigación proyectará determinar los valores y transformaciones de factores que influyeron en su desarrollo:

- Geometría y forma. Variables que determinaron el funcionamiento estructural y proyectual de la edificación para la correcta aplicación de las retículas.
- Modelos reticulares. Analizar la utilización de modelos reticulares aplicados a diferentes proyectos y edificaciones, determinando los beneficios obtenidos y modificaciones realizadas.
- Sistemas constructivos y estructurales. Analizando cuales son cada una de las variables que han determinado el desarrollo proyectual y constructivo.

Al analizar las transformaciones obtenidas en sus diferentes variables aplicando una metodología clara de investigación, se obtuvo un trabajo de investigación con conclusiones concretas que le otorgará un valor científico al trabajo de investigación.

Dentro de la metodología de investigación se planteó como principal fuente de investigación la recolección de datos bibliográficos que se desarrolló en el proceso de realización de la tesis en diferentes centros de información:

- Biblioteca ETSAM (Universidad Politécnica de Madrid, España).
- Biblioteca central (SLUB) de la TU (Universidad Técnica de Dresde, Alemania).

- Biblioteca central de la BUAP (Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México).
- Biblioteca del COAM (Colegio de Arquitectos de Madrid)
- Biblioteca de la escuela de arquitectura de la UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México)
- Biblioteca de la UDLAP (Universidad de las Américas Puebla)
- Base de datos de la IASS (International Association for Shell and Spatial Structures, Madrid, España)
- Bases de datos científicas vía internet.

Los datos bibliográficos obtenidos son principalmente:

- Documentos bibliográficos científicos.
- Publicaciones científicas en congresos.
- Publicaciones científicas en revistas indexadas.
- Patentes.
- Tesis.
- Libros.

Una vez obtenidos los datos bibliográficos se iniciará un proceso de análisis de la bibliografía que pueda determinar el valor esencial de esta investigación tomando como base el siguiente esquema del proceso de análisis a seguir:

ESTADO DE LA CUESTIÓN

La retícula triangular para el diseño de estructuras y diseño de proyectos arquitectónicos ha tenido una gran evolución en los últimos 200 años, evolucionando de ser utilizado como vigas para puentes como elementos lineales a estructuras de formas complejas y sistemas estructurales tridimensionales, como el sistema Diagrid para solución de estructuras de grandes claros y altura. Para lo cual se ha observado una amplia bibliografía en revistas, journals, libros y tesis de diferentes temas, que tocan el tema y edificaciones de estructuras reticulares, principalmente estructuras espaciales, dejando en muchos casos la importancia del desarrollo de la retícula en los últimos años.

Estudiosos, investigadores, arquitectos e ingenieros ubican el inicio reticular aplicado a las estructuras a principios del siglo XIX con la revolución industrial y la posterior invención del ferrocarril, marcando un cambio en la forma de fabricar materiales y construir edificaciones de la época por medio de la industrialización, propiciando que los métodos de construcción dieran un paso en proponer nuevas formas de proyectar. Posteriormente la invención del tren necesito de la construcción de vías férreas y puentes para cruzar ríos y barrancas, lo que trajo consigo nuevos diseños y sistemas constructivos de celosías para dar solución a las nuevas necesidades de transporte.

A mediados del siglo XIX, Joshep Paxton diseña y construye una de las estructuras más impresionantes de la historia de la arquitectura del siglo XIX para la Exposición Universal de Londres de 1851, *El Palacio de Cristal*, utilizando por la prefabricación para la construcción del edificio, disminuyendo considerablemente los tiempos de construcción a aproximadamente 6 meses, donde arquitectos como Konrad Wachsmann marcan el inicio de la era de la prefabricación como un factor importante para el desarrollo y aplicación en la propuesta de diseños a la ya naciente industria de la construcción.

Posteriormente a finales del siglo XIX, en las exposiciones universales con la consolidación de la era del hierro, sobresale la exposición universal de París en 1889, don se realizaron dos obras representativas, la Torre Eiffel y La Galería

de Máquinas, ambas realizadas de hierro, logrando escalas que antes eran pensadas imposibles de construir, además de mostrar grandes avances en las formas de fabricar, montar, construir y calcular las nacientes estructuras reticulares.

A finales del siglo XIX, se consolidan los trabajos del ingeniero ruso Vladimir Shukhov con la aplicación de estructuras ligeras empleando los entramados, en conjunto con el desarrollo de formas complejas empleando paraboloides e hiperboloides, para generar volúmenes de doble curvatura o al aplicar técnicas de rotación de curvas para la generación de formas, Shukhov se convertirá en una influencia de arquitectos e ingenieros que reconocen en su trabajo la importancia de la retícula, como lo ha mencionado Norman Foster. El trabajo de Shukhov será importante de mencionar, ya que se puede considerar como el primer predecesor de las estructuras Diagrid.

A principios del siglo XX, el inventor Alexander Graham Bell, utilizando la forma geométrica del icosaedro como base reticular, experimenta en estructuras que puedan ser capaces de volar y en la construcción de una torre de observación, logrando fabricar lo que se consideran por algunos autores e investigadores como las primeras estructuras espaciales construidas.

Pero es a mediados del siglo XX en el mundo de la posguerra, donde se dan grandes avances en el desarrollo de las estructuras ligeras, principalmente las reticulares, causado principalmente por la escases de materiales y de mano de obra calificada para la fabricación de estructuras, acrecentándose con la utilización de materiales como el acero para la industria del armamento coincidiendo con el inicio de la Guerra Fría y la Guerra de Corea.

Esto no solo provoco que se buscarán nuevas formas de desarrollar estructuras ligeras usando el mínimo de material y mano de obra calificada, iniciada por investigadores y constructores como F. Samuely en Gran Bretaña, G. Günshell en Alemania, F. Castaño en México y E. Catalano en Estados Unidos, buscando utilizar nuevos materiales y sistemas constructivos que pudieran dar solución a las nuevas propuestas formales, como lo fue el uso de tornillos de alta resistencia o el empleo de sistemas estructurales prefabricados

como el sistema MERO, utilizando materiales como aluminio, plástico y madera entre otros. Sirviendo posteriormente como base de otros sistemas prefabricados que reducían considerablemente la mano de obra calificada, consumos energéticos y empleo de materiales.

A mediados del siglo XX investigadores y constructores como Felix Samuely, Z. Makowski, Robert Le Ricolais, Konrad Wachsmann, Richard B. Fuller, Heberto Castillo y Eduardo Catalano entre otros, plantean el uso de figuras geométricas regulares para la búsqueda de formas más complejas o sistemas estructurales innovadores, en la búsqueda de mejorar el desempeño y optimizar los recursos de las estructuras y diseños.

A finales de los años 60's y principios de los años 70's se da un nuevo avance en las estructuras de retícula triangular. El Palacio de los Deportes de la ciudad de México, construido para los juegos olímpicos de 1968 del arquitecto Félix Candela en colaboración con Antonio Peyrí y Enrique Castañeda, marca un punto de cambio en el empleo de las formas y su diseño, aplicadas a la construcción de estructuras de grandes luces. A finales de los años 1960's se construye un edificio de altura utilizando un arriostamiento en diagonal para reforzar la estructura del tubo estructural en el proyecto del John Hancock Center de SOM, convirtiéndose en un precedente de las estructuras de altura que emplean el sistema Diagrid de la época contemporánea.

En el año de 1982 el arquitecto Norman Foster plantea por primera vez una retícula Diagrid para solución de un edificio de altura, eliminando las columnas en vertical y disminuyendo por lo tanto el consumo de materiales en el proyecto para el concurso del Humana Headquarters, al proponer una disminución de las posibles secciones estructurales a emplear, aunque la propuesta no fue la ganadora, posteriormente en el año 2004 se concluiría la Swiss Re Tower, siendo el primer edificio en utilizar el sistema estructural Diagrid en un edificio de altura.

A principio de los años 1990's inicia una revolución digital para el diseño y construcción de edificaciones, siendo el Walt Disney Concert Hall el primer proyecto solucionado digitalmente para su construcción, esta metodología

cambio la forma de concebir un proyecto dando entrada una vez más a nuevas formas arquitectónicas aún más complejas, ocasionando la necesidad de nuevos materiales y el desarrollo de nuevos sistemas constructivos y de fabricación. La entrada de la era digital en la industria de la construcción plantea nuevos retos en la actualidad de la arquitectura y donde las retículas triangulares serán una de las soluciones más sencillas para generar formas libres por medio del suavizado de sus superficies curvas, y finalmente se continua con la idea iniciada en a mitad del siglo XX empleado estructuras ligeras reticulares, conformándose como el futuro de las estructuras en las edificaciones.

Por lo que la utilización de reticulados estructurales triangulares, le han agregado valores a la forma y construcción de diferentes proyectos, donde se han adaptado dependiendo del uso y lugar de la edificación, así como los materiales empleados para su fabricación.

La bibliografía encontrada hace una descripción de las estructuras reticulares, principalmente las espaciales y actualmente el sistema Diagrid en edificios de altura, pero no especifica, ni profundiza como se ha dado la línea de desarrollo y evolución de las estructuras reticulares, menciona en algunos casos reseñas históricas, pero no específica y explica el contexto histórico que permite su consolidación. Se plantean y mencionan, a precursores y desarrolladores de la técnica de diseño y construcción, pero no como los precursores y desarrolladores influyen en la generación de la técnica e influyen en la forma, y en muchos casos olvidando a importantes diseñadores y constructores que han intervenido de manera activa en la consolidación de las estructuras reticulares.

Pero quizás una de las grandes preguntas a resolver una vez analizado el periodo de tiempo propuesto entre los años de 1946 y 2003, es cual es el futuro cercano de la aplicación de una técnica de reticulado para la solución de las nuevas propuestas de forma y edificaciones empleando estructuras ligeras de retícula triangular.

Desarrollo futuro

Ante el actual desarrollo que han tenido las estructuras reticulares triangulares para la construcción de proyectos innovadores en la actualidad con la posibilidad infinita de generación de formas, influenciado principalmente por los avances tecnológicos que se han dado en todas las industrias para el mejoramiento de los servicios otorgados, y ante el mejoramiento de los sistemas constructivos, el futuro del uso de las estructuras reticulares triangulares es ambicioso.

La evolución que ha mostrado las estructuras reticulares y las estructuras en edificios de altura, empleadas para hacer más eficiente todos sus procesos y lograr disminuir sus costos, factores que colocado a estas estructuras como una de las soluciones con grandes ventajas con respecto a otras.

Las formas que en un futuro se pueden lograr aprovechando las ventajas que proporcionan la estructuras reticulares son infinitas ante las posibles variaciones que un volumen puede llegar a tomar. Las formas no tendrán límites ante los logros que se han obtenido en los últimos años, al poder lograr construir proyectos innovadores del siglo XXI de formas libres como el New Trade of Milán o el Heydar Aliyev Centre, diseñando formas estéticas, elegantes y funcionales aplicadas a las necesidades del proyecto.

Pero también, continua la carrera de los edificios de altura y la necesidad actual de disminuir los costos de los servicios de infraestructura aumentando su altura, en este tipo de edificaciones se empiezan a plantear una vez más a finales del siglo XX y principios del siglo XXI, propuestas de construcción de megaestructuras que puedan concentrar la mayor cantidad de servicios, ejemplos que han sido propuestos en años anteriores por Stanley Tigerman o Yona Friedman en los años 1960's, ideas que empiezan a retomarse para proponer proyectos innovadores y ambiciosos para un futuro, donde la posible construcción de estructuras en altura como la Torre Milenio de Norman Foster o la Megapiramide Shimizu, que aplicando la retícula triangular puedan convertirse en las soluciones estructurales futuras.

Finalmente se espera que en conjunto con los avances tecnológicos aplicados a estructuras de retícula triangular, diseñadores y constructores puedan estudiar, explorar e investigar, para finalmente desarrollar proyectos más eficientes con un gran potencial estético y estructural sin limitaciones técnicas, donde la única restricción del arquitecto o ingeniero diseñador sea su propia imaginación y para lograrlo hay que tomar en cuenta las palabras del arquitecto Shigeru Ban “Sin el entendimiento de las estructuras, no podemos diseñar un edificio” (Ban, 2014; Bradshaw, Campbell, Gargari, Mirmiran, & Tripeny, 2002; Gonzalez Meza & Anaya Díaz, 2013).

Capítulo 1

1. EL DESARROLLO DE LAS ESTRUCTURAS RETICULARES

1.1.La tipología de las retículas como solución del sistema estructural para el entendimiento.

La tipología de las estructuras reticulares puede ser muy variada, dependiendo de los autores e investigadores, lugares de desarrollo y periodos de tiempo. Los autores basarán su tipología principalmente: en el entramado de la retícula que define a la estructura y que da solución al proyecto empleando una diversidad de materiales y nodos para la construcción de las mallas; de su forma geométrica, que dependerá de la retícula empleada y cuyo sistema constructivo se adaptará a la forma; y finalmente el número de capas que definirá en una gran parte el comportamiento de la estructura en un proyecto. Estas tipologías que se generan, además de los diversos factores que influyen en el diseño y desarrollo del proyecto, y que afectarán a la tipología, pueden ser observadas con el desglose y evolución de proyectos, y etapas propuestas que se mostrarán más adelante.

El entendimiento de la tipología reticular formada en una estructura, será un factor importante para lograr proponer una clasificación y dar solución a un sistema estructural, además de que dependiendo del proyecto arquitectónico a resolver, se podrá entender la estructura que se propone como solución del diseño arquitectónico y que se emplea para dos fines principales: cubrir o soportar el proyecto. Para finalmente proponer el empleo de la retícula triangular, como una solución de los tipos de mallas, como las más empleadas para mejorar las características que se proporcionan al proyecto, siendo las estructuras de tipo reticular triangular fabricadas con tubulares y perfiles metálicos las más empleadas en la actualidad, ya que son ideales para una distribución más homogénea de los esfuerzos y cargas.

Sin importar el uso que tenga la estructura y edificación, las técnicas de construcción y fabricación, así como avances tecnológicos, y el uso de la retícula en estructuras, ha mostrado varias ventajas que servirán para el entendimiento de las diferentes tipologías generadas, como (Meza & Diaz, 2013):

- La ventaja principal de las estructuras reticulares, es que generalmente todos los elementos contribuyen a la capacidad de carga.

- Eficiente contra cargas laterales y verticales.
- Ligereza.
- Unidades prefabricadas que permiten producción en masa y modulares.
- Elegantes y económicas.
- Mínimas deformaciones por su alta rigidez.
- Fácil ensamblado.
- Fácil de transportar.
- Mayores distancias entre apoyos.
- Permiten el uso de materiales no estructurales.
- Algunas estructuras son desmontables.
- Flexibilidad en el diseño de formas.
- Variedad en la utilización de materiales.
- Resistencia a la flexión y cortante, funcionando a trabajo simple, compresión y tracción.
- Un daño local en el reticulado difícilmente conduce al derrumbamiento de toda la estructura.

Sobresaliendo que en el reticulado triangular una de las grandes ventajas con respecto a otro tipo de reticulados es la extraordinaria rigidez y repartición más uniforme de los esfuerzos.

Además de las ventajas que se pueden obtener al diseñar una estructura reticular, hay algunos factores que afectan el diseño y construcción de retículas espaciales como lo son: el comportamiento de elementos estructurales, luces y radios de peralte, detalles de soporte, precisión dimensional, pre-combado, revestimiento y acristalamiento, erección, comportamiento contra fuego, y finalmente sismo y viento.

La consideración más importante en el diseño de las estructuras reticulares espaciales y tri-direccionales, es el pandeo de las cuerdas a compresión y los miembros de refuerzo de la red, asimismo el diseño de las juntas para transmitir efectivamente y eficientemente las fuerzas axiales entre las barras y nodos mientras al minimizar los efectos secundarios de flexión (Chilton, 2000). En lo que se refiere al diseño de estructuras reticulares de altura, la consideración más

Ilustración 1 Dibujo de radiolarios (Le Ricolais, 1997b).

importante es la capacidad de soportar las cargas laterales, principalmente generadas por viento y su capacidad de transmitir las a los cimientos, siendo el diseño eficiente de los nodos y desarrollo de la retícula, factores a considerar en la solución final del proyecto. Para entender las tipologías será importante determinar los factores que las influyen en su generación.

La naturaleza como tipología de la forma de las estructuras reticulares.

Las estructurales reticulares actualmente trabajan como estructuras espaciales y en algunos casos tri-direccionales, que se pueden encontrar en tamaños de tipo micro y macro escala, en el mundo orgánico e inorgánico que nos rodea donde su orden físico está reflejada en la geometría. En la actualidad las formas naturales en el mundo inorgánico de la construcción empiezan a ser escogidas al ser adaptadas a la terminología de la sustentabilidad como solución de estructuras reticulares y en muchas otras ocasiones, las geometrías generan digitalmente formas artificiales más complejas cuyo solución solo podrá ser entendida con ayuda de los ordenadores. La naturaleza está llena de ejemplos que muestran los principios de las superficies reticulares y sus características espaciales, donde en varios casos su ejemplo de la formación, será de importancia en la generación de las soluciones. Es aquí donde los diseñadores de las estructuras reticulares deberían estudiar la geometría de la naturaleza, ejemplo Robert Le Ricolais, al estudiar los patrones formados en estructuras como los

huesos y los radiolarios, no solo para dar soluciones basados en la naturaleza, sino también para el diseño de formas artificiales, al ser la naturaleza un gran maestro para la generación de tipologías de estructuras y formas.

Por observación de estructuras análogas encontradas en la naturaleza, Le Ricolais se consolidó como el primer estudioso de este tipo de estructuras, él encuentra que hay ciertos tipos de estructuras preferibles que se pueden generar copiando la naturaleza (Z. S. Makowski, 1968):

- Una está formada por pirámides de base cuadrada que colocadas una al lado de la otra forman un reticulado espacial en 2 direcciones. Es decir que cada capa está formada por 2 redes de barras entrecruzadas. Con la unión de tetraedros y octaedros regulares se consigue una estructura mucho más rígida.

Estructuras similar en esqueletos tridimensionales de la fauna acuática (Radiolarios y algas).

1.1.1. Configuración de las tipologías de retículas estructurales laminares y espaciales como factor determinante para el desarrollo de las estructuras reticulares.

Las tipologías reticulares son diversas dependiendo de como se genera la malla triangular, lo que dará como resultado una diversificación reticular dependiendo del proyecto estructural a solucionar, así como el sistema constructivo y el sistema estructural escogido, por lo que su clasificación puede ser variada dependiendo de los estudiosos e investigadores del tema.

Para poder entender el desarrollo de las diferentes retículas, hay que tomar en cuenta las características que influirán en la tipología de las mallas:

- La retícula empleada (estructuras espaciales y/o laminares).
- Número de capas.
- El material y los nodos empleados.
- La forma geométrica generada.
- El sistema estructural y constructivo empleado en la retícula.

Aunque todas las características estarán entrelazadas unas con otras, ya que la modificación en alguna influenciará a las demás, un ejemplo es en el número de capas, que va a ser influenciada por factores y características que determinarán la forma geométrica que se esté generando o viceversa, además del sistema estructural y constructivo utilizado para la solución final, ya que dependiendo del proyecto que se ha diseñado, el sistema empleado y los materiales escogidos, estos influirán para determinar el número de capas necesarias, inclusive la estética buscada, y la retícula final generada y necesaria en base a la forma que determinará el éxito del proyecto.

1.1.1.1. La generación de la retícula y su influencia en el diseño de la superficie estructural.

El número de capas de una estructura reticular tendrá una influencia directa en el comportamiento y funcionamiento de una estructura reticular, dependiendo de las diferentes variantes de materiales, así como sistemas constructivos y estructurales a emplear. Por lo tanto es importante analizar los diferentes tipos de estructuras en base a el número de capas y como afectan en su comportamiento, además de la posible aplicación a los diferentes proyectos. La generación de estas geometrías tendrá una base en los elementos lineales de vigas en celosía para la formación de geometrías más complejas en el plano y posteriormente en el espacio conforme su evolución, por lo que será adaptada a las necesidades.

En lo que corresponde a la clasificación de las estructuras, dependiendo del número de capas que forman la estructura espacial las podremos clasificar según diferentes autores en:

- Estructuras de una capa.
- Estructuras de doble capa.
- Estructuras multicapa.

1.1.1.2. Estructuras de una capa.

El entramado de una capa es la forma más simple de construir una estructura reticular, al estar constituido por dos redes de vigas o miembros fabricados principalmente tubulares o de perfiles situados en un plano, cruzándose en

Ilustración 2 Redícula en 2 direcciones (rectangular y diagonal) (Z. S. Makowski, 1968; Narayanan, 2006).

Ilustración 3 Redículas en 3 direcciones (Triangular, Triangular-Hexagonal, Hexagonal) (Z. S. Makowski, 1968; Narayanan, 2006).

ángulo recto u oblicuamente, las vigas o miembros son unidas en su punto de cruce por un nodo, normalmente prefabricado y las cargas actúan normalmente al plano de las vigas.

Las estructuras reticulares de una capa, tendrán en común con las estructuras de doble capa, la capacidad de dispersar las cargas a través de los elementos de la retícula donde el interés del empleo de este tipo de estructuras se ha aumentado a través de los años (Narayanan, 2006). Stéphane du Château en algunos casos al igual que Z. Makowski las denominaran como estructuras tri-direccionales cuando la retícula generada es en tres direcciones.

Las estructuras que se denominan tri-direccionales, pueden ser organizadas y clasificadas no solo de acuerdo a su geometría, sino también a la forma de las caras que se generan, o pueden ser organizadas basada en los patrones que forman los miembros del entramado (Schueller et al., 1983)

Ilustración 4 Bóveda cañón para un gimnasio en Lycee, Gregoire y du Château, 1962 (Z. S. Makowski, 1968).

Ilustración 5 Retículas en 4 direcciones (Z. S. Makowski, 1968; Narayanan, 2006).

Las principales retículas que se emplearán en las estructuras de una capa, dependerá mucho de la forma geométrica que se emplea para la solución del proyecto, tomando en cuenta que la estructura empleada según la geometría. Las retículas de una capa se podrán dividir en 3 tipos de formas geométrica principales para analizar las retículas que se generan en una estructura de una capa:

- Estructuras planas
- Geometrías de forma libre.
- Domos.
- Bóvedas cañón.

El tipo de retículas que se forman principalmente en una capa, se podrán clasificar en 3 tipos dependiendo del sentido de sus elementos principales y tomando en cuenta a diversos autores en las estructuras de forma plana y libre:

- Retículas de 2 direcciones.
- Retículas de 3 direcciones.
- Retículas de 4 direcciones.

A través de los años la retícula ortogonal ha sido una de las retículas más empleadas, donde en la mayoría de los casos las estructuras son soportadas en sus 4 lados, este tipo de retículas no se caracterizan por conducir de manera uniforme los esfuerzos. Siendo las retículas en dos direcciones en forma rectangular y diagonal las más usadas en diversos proyectos estructurales.

Las retículas en 3 direcciones, es la retícula triangular más empleada, ya que ha mostrado ser

extremadamente resistente y conducir de manera uniforme los esfuerzos a través de sus elementos estructurales. En la actualidad se ha convertido en el entramado que más gusta en la solución de estructuras reticulares ligeras.

Ilustración 6 Dibujos de los modelos realizados por los estudiantes de R. Le Ricolais (Fracari, 2002).

Siendo el ingeniero francés Robert Le Ricolais, el que describiría algunas de estas tipologías en su artículo de 1946, escribiendo sobre las estructuras espaciales reticulares de tres direcciones. Y donde también construiría varios modelos estructurales en madera aplicando los entramados de una capa, haciendo que este tipo de retículas puedan ser construidos con miembros interconectados por nodos, ambos idénticos en su mayoría (Narayanan, 2006).

Las retículas en 4 direcciones se podrían definir como una combinación de las retículas ortogonales y diagonales para mejorar la distribución uniforme de los esfuerzos de la retícula ortogonal, por lo que pueden ser simplemente soportadas en sus 4 esquinas.

En las retículas en 4 direcciones y en 3 direcciones de tipo triangular, las deformaciones serán mucho menores por sus elementos en diagonales, y por lo tanto más rígidas, esto permitirá un ahorro de materiales, lo que hará que las estructuras sean ligeras y económicas, al limitar el número de módulos por los que la retícula será dividida, logrando un mayor espaciado entre los miembros estructurales, además de poder construir estructuras de mayores luces.

Las barras o miembros que forman las retículas en los últimos 60 años han ido evolucionando y desarrollando una gran variedad de retículas de estructuras poliédricas aplicadas a estructuras de una o más capas que se generan con las

diferentes formas de polígonos y poliedros, y que pueden ser observadas en el siguiente modelo de W. Schueller (Imagen 7) y que también son aplicados a estructuras reticulares multicapa dependiendo de los módulos poliédricos que sirven como base para la generación de las mallas y que en la actualidad una gran variedad de módulos son empleados.

En las geometrías reticulares más complejas, se pueden diseñar y producir al combinar los polígonos regulares con otras formas poligonales irregulares para la conformación del entramado, logrando obtener retículas que sean personalizadas al proyecto dependiendo de la forma generada, y que a la vez cumplan con el objetivo de estabilizar y aligerar una estructura. Siendo la técnica de desarrollo de formas complejas la de mayor uso en la actualidad, por medio de la generación de una superficie de doble curvatura, característica que otorgará mayor estabilidad y menor deformación para resistir los esfuerzos que se generen, trabajando de similar manera a las estructuras que por medio de un plegado se otorga mayor rigidez a la superficie.

Hay 4 polígonos regulares que van a ser usados con mayor regularidad por diversas características que influyen en el comportamiento de una estructura y que se pueden observar en el diagrama generado por Schueller, y que en combinación como módulo de generación en 2 planos, se generaran módulos en 3 dimensiones dependiendo de los polígonos empleados, desarrollando una gran variedad de volúmenes geométricos capaces de dar solución a una retícula en 2 o más capas, marcando la evolución reticular de las estructuras de una capa a estructuras multicapa, siendo los polígonos regulares más empleados para la generación de retículas de una capa los siguientes:

- Triángulos (principalmente equiláteros).
- Cuadrados.
- Pentágonos.
- Hexágonos.

Ilustración 7 Transformación de las retículas en base a módulos geométricos (Schueller et al., 1983).

1.1.1.3. Estructuras de doble capa y multicapa.

A través de los años en el campo de las estructuras reticulares espaciales, las estructuras de doble capa son las que han mostrado un mayor desarrollo y progreso, en conjunto con la prefabricación de sus elementos, también son las que muestran mejor comportamientos para dispersar los esfuerzos y cargas generadas en la estructura. Surgidas de una evolución de las estructuras reticulares de una capa de la primera mitad del siglo XX, hace necesario entender para su desarrollo el comportamiento estructural de estas estructuras, principalmente en trabajo a compresión, y que evolucionaran a ser equilibradas por el propio cerramiento en capas metálicas equilibradas en forma de tetraedros y octaedros haciéndolos trabajar finalmente a tracción, afirmación que puede ser observada en la cúpula del Baton Rouge (Union Tank Car Dome) de Fuller, utilizando elementos trabajando a tracción.

Ilustración 8 Domo Baton Rouge, Lousiana, 1958 (Fairley & Hummel, 2013).

Estas retículas de doble capa consisten principalmente en dos retículas en su mayoría planas y en la actualidad generadas por diversas curvas, formando así una capa superior y una inferior respectivamente, paralelas una de otra e interconectadas por miembros diagonales y/o verticales. En lo que se refiere a estructuras espaciales consisten principalmente en tetraedros, hexaedros y octaedros, o esqueletos de pirámides de base triangular cuadrada o hexagonal, los patrones de la retícula superior e inferior pueden ser idénticos o diferentes (Narayanan, 2006).

Ilustración 9 Pabellón deportivo del Real Madrid (Margarit & Buxadé, 1972).

Autores como Schueller, Ramaswamy, Chilton, Makowski y Eekhout entre otros, hacen una clasificación de las estructuras dependiendo de los sistemas de construcción, unión y diseño de retículas de las estructuras de doble capa, clasificaciones que serán importantes para poder analizar los elementos que comprende este tipo de estructuras, así como su comportamiento ante las diferentes cargas que se generen, posteriormente se propone una clasificación basándose en los diferentes autores.

Las retículas generadas para la fabricación de una estructura de doble capa, pueden variar dependiendo del diseño o proyecto estructural aplicado al diseño arquitectónico, ya que cada estructura puede diferir dependiendo de las características y necesidades a cumplir de cada proyecto, y para su fabricación pueden ser empleados sistemas modulares prefabricados de estructuras espaciales y tri-direccionales (una capa), así como sistemas de nodos de unión industrializados, como lo son el sistema MERO, Triodetic, etc., o sistemas estructurales diseñados exclusivamente para el proyecto, principalmente fabricados en un taller especializado.

Las estructuras reticulares de dos o más capas se podrán clasificar dependiendo de los patrones de las mallas que se formen en cada una de las capas y en como se superponen entre ellas. En base a las retículas se pueden clasificar dependiendo de los diferentes autores en:

- Entramado en 2 direcciones.
 - Cuadrado sobre cuadrado sin offset.

Ilustración 10 Retículas de doble capa (Schueller, Heck, & de Strasbourg, 1983).

- Cuadrado sobre cuadrado con offset.
- Cuadrado en diagonal sobre un cuadrado más pequeño inclinado 45°
- Cuadrado en diagonal sobre un cuadrado más grande inclinado 45° .
- Entramado con huecos internos.
 - Cuadrado sobre cuadrado con offset.
 - Cuadrado sobre un cuadrado más grande inclinado 45°
- Entramado en 3 direcciones.
 - Triángulo equilátero sobre triángulo equilátero sin offset.
 - Triángulo equilátero sobre triángulo equilátero con offset.
 - Hexágono regular y triángulo sobre offset de triángulo equilátero.
 - Entramado con pirámides triangulares.
 - Entramado con pirámides tetraédricas.

La distribución de esfuerzos en retículas de 3 direcciones de doble capa es más uniforme bajo cargas asimétricas que en retículas en 2 direcciones. Esta distribución de esfuerzos se puede ver afectada por la relación de longitud de la luz y peralte de la estructura. La rigidez de las uniones ayudarán en la estabilidad de la retícula estructural y a disminuir las deformaciones, aun así el tamaño del perfil de los miembros se incrementará con respecto a los momentos a flexión.

Triángulo equilátero
sobre triángulo
equilátero con offset

Cuadro diagonal
sobre cuadro más
pequeño sesgado 45°

Hexágono regular y
triángulo sobre
triángulo equilátero
con offset

Cuadro diagonal
sobre cuadro más
grande sesgado 45°

Ilustración 11 Retículas de doble capa (Schueller et al., 1983).

Las ventajas de las estructuras de doble capa son variadas, con este tipo de diseño se pueden obtener mayor rigidez y mayor flexibilidad en la forma que puede adoptar la estructura, así como la ubicación de sus apoyos. Otras ventajas de las estructuras de doble capa es la facilidad de colocación de ductos y tubos de instalaciones entre las capas; la estandarización de sus elementos por medio de la prefabricación y el apoyo de la tecnología que permite la fabricación en masa, lo que representa reducción de costos, tiempo de construcción, fácil montaje y facilidad de transportación. Una de las grandes ventajas de este tipo de retículas es cuando una barra cualquiera pandee bajo la acción de una carga aislada, los otros elementos se reparten la carga gracias a la alta hiperestaticidad del sistema. Así se evita la destrucción del conjunto (Z. S. Makowski, 1968).

1.1.1.4. Las mallas en las envolventes reticulares tipo bóveda cañón y cúpulas.

Aunque las envolventes tipo bóveda cañón y cúpulas, pueden ser diseñadas y fabricadas de una o dos capas, las retículas que se utilizan pueden ser diferentes a las generadas en estructuras planas y por lo tanto su comportamiento estructural de la envolvente puede variar dependiendo del sistema estructural empleado y el proyecto a resolver.

Ilustración 12 Principales retículas de estructuras tipo bóveda cañón (Z. S. Makowski, 1986; Schueller et al., 1983).

Estructuras tipo bóvedas cañón.

Las estructuras tipo bóvedas cañón son consideradas en algunos casos cascaras cilíndricas compuesto de diferentes curvas, además de diferentes sistemas constructivos y estructurales sólidos y/o entramados, siendo los sistemas que emplean una retícula como solución de la estructura los de más interés para esta investigación, donde diferentes mallas son posibles para estas denominadas cascaras cilíndricas. Siendo las retículas más utilizadas:

- Retículas rectangulares.
- Retículas diagonales (tipo lamella).
- Retículas en 3 direcciones.
- Retículas hexagonales.

El desarrollo de las formas de cascaras reticulares tipo bóvedas cañón, se origina en simples bóvedas cañón de albañilería que fue perfeccionado por los romanos tal como se expresa de manera poderosa en la Basílica de Maxentius en Roma (313 A.D.), donde las bóvedas alcanzaron luces de 26 metros. Su evolución de pesadas bóvedas de albañilería similares a un túnel, a bóvedas de crucería y finalmente a la elegante bóveda flotante y a la bóveda de crucería compleja de las catedrales góticas que tomaron más de tres siglos. La transformación de la bóveda al cascarón es un logro del siglo XX. Franz Dischinger y Walter Bauersfeld desarrollaron la teoría necesaria para el diseño de las cascaras cilíndricas de hormigón y que fueron construidos en 1924, el primer cascarón cilíndrico de hormigón reforzado fue

Ilustración 13 Großmarkthalle, Frankfurt (Main), Alemania, Walther Bauersfeld, Mergler y Franz Dischinger, 1926-1928 (Golombek, 2012; Günschel, 1966; Peseke, Grohmann, & Bollinger, 2010).

construido para la compañía The Zeiss en Alemania (Schueller et al., 1983) en el proyecto de la *Großmarkthalle en Frankfurt (Main)*. Anteriormente Föppl desarrollaría las cubiertas reticulares tipo bóvedas cañón a finales del siglo XIX.

Estructuras tipo cúpulas.

Históricamente las cúpulas o domos representan una ideología. En la Roma antigua, en el mundo cristiano e islámico son asociados con templos, iglesias, mezquitas, tumbas, baños y otros lugares de reunión. Los grandes domos modernos se desarrollaron fabricados de hierro, especialmente después de la segunda mitad del siglo XIX, popularizados empleando la retícula Schwedler (Pottmann, Asperl, Hofer, & Kilian, 2007).

Los domos reticulares arriostrados se vuelven más populares por las grandes luces que empiezan a cubrir, ya que poseen gran rigidez, debido a la falta de columnas internas o elementos de arriostramiento horizontales, por lo que tienen un espacio interno completamente sin obstrucciones.

Todos los domos son superficies de revolución. Las retículas formadas en los domos de entramado se pueden clasificar en un intento de mostrar las posibilidades del desarrollo de la retícula según Schueller de la siguiente manera:

- Retícula de proyección sobre una superficie de revolución.
 - Domos de retícula de poliedros regulares.
 - Domos reticulares.

- Retícula de disposición del esqueleto en una superficie de revolución.
 - Domos de elementos de costillas radiales.
 - Domos de elementos curvilíneos.
 - Domos de elementos concéntricos.

Ilustración 14 Retículas de domos (Zygmunt Stanislaw Makowski, 1984; Schueller et al., 1983) (Diseño propio).
Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Arquitectura – D.C.T.A.

1.1.1.5. Las retículas de las estructuras de superficies de forma libre.

Las estructuras de forma libre serán generadas por mallas de formas básicas, que determinarán la estética de la superficie desarrollada en la superficie de forma libre, donde la malla debe de optimizar la calidad de la estructura, y la escala de la retícula y finalmente el suavizado de las superficies poliédricas que se generan. El tipo de retícula empleada será la base para generar la forma libre de la superficie y se puede clasificar así (H. Pottmann et al., 2007; Pottmann, Schiffner, & Wallner, 2008):

- Retículas triangulares arbitrarias.
- Retículas ortogonales con caras planas.
- Retículas poliédricas.
- Retículas paralelas.
- Retículas offset.
- Retículas con paneles reglados.

Ilustración 15 Retículas de superficies de forma libre suavizadas por la escala de la malla (H. Pottmann et al., 2007).

Las retículas que emplean el triángulo como la figura más básica para la generación de las formas libres, determinan un diseño conveniente y en un camino estructuralmente estable de representar las formas suaves. Aunque las retículas cuadradas o hexagonales tienden a ser más ligeras y pueden ser construidas con nodos y vigas geoméricamente estables, la geometría de estas

retículas son más difíciles de solucionar (Pottmann, Liu, Wallner, Bobenko, & Wang, 2007)

Las retículas o mallas de superficies de forma libre se pueden considerar para su generación como superficies offset donde se consideraran para su fabricación por lo tanto dos capas (Pottmann et al., 2008), o en algunos casos el empleo de una capa como solución de la forma como lo propuso el Ing. Castaño.

1.1.1.6. La transformación tipológica de la retícula triangular para la optimización de las estructuras ligeras.

La evolución de la retícula y su empleo en el desarrollo de la forma de las envolventes y edificaciones para optimizar el proceso de diseño, además del proceso de construcción, han sufrido en los últimos años un desarrollo que empezó desde principios del siglo XIX, desarrollo y evolución muchas veces influenciado por los avances tecnológicos y las necesidades requeridas de cada época ante las diversas circunstancias políticas, económicas y culturales que se generaban.

Posteriormente, a mediados del siglo XX las estructuras reticulares inician un apogeo ante las carencias que planteo la terminación de la Segunda Guerra Mundial, siendo las estructuras espaciales y tri-direccionales las que mayor evolución muestran para el desarrollo de los proyectos reticulares, donde la evolución de la forma en estructuras ligeras, influenciada por el reticulado de sus estructuras, optimizan la transmisión de los esfuerzos y el consumo de insumos necesarios para su construcción.

Este apogeo de las estructuras reticulares que se da a mediados del siglo XX, se consolida con la industrialización y prefabricación de los miembros de las estructuras, conjuntamente con el desarrollo de nuevas retículas como los domos geodésicos y Kiewitt, además de la superposición de las formas básicas y volúmenes geométricos básicos que servirán para proponer nuevas tipologías reticulares mezcladas por medio de la superposición de redes en el plano, y que se vayan adaptando a las nuevas propuestas estructurales reticulares con capacidad de adaptarse a la forma diseñada. Ante el análisis de los proyectos

que se presentan se resume esta transformación de la retícula en el siguiente diagrama.

Ilustración 16 Diagrama para el desarrollo de la retícula triangular (Zygmunt Stanislaw Makowski, 1984; Z. S. Makowski, 1986, 1990; Schueller et al., 1983) (Diseño propio).

Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Arquitectura – D.C.T.A.

Con el desarrollo de este diagrama se puede observar y entender las geometrías utilizadas para la generación de las retículas, además de proponer como se han dado las transformaciones reticulares desde el empleo de polígonos, que combinados generan retículas lineares capaces de adaptarse a las formas estructurales propuestas en el espacio por medio de la combinación de poliedros. El entendimiento de este diagrama, puede plantear futuras propuestas reticulares que se adapten a futuras formas y tecnologías de edificaciones que signifique un reto a resolver, al plantear que por medio de una mezcla de geometrías y teselados empleados y no empleados, como los diseñados por Emmerich y Critchlow, muchos de ellos basados en una ideología árabe, generando así propuestas reticulares que pueden ser infinitas.

Dentro de este planteamiento de las retículas y su transformación, es importante tomar en cuenta que la forma de un domo plantea soluciones reticulares que no han sido utilizadas en otras propuestas geométricas y de edificaciones, por lo que se mencionan en un apartado especial para hacer referencia a las propuestas y soluciones empleadas en proyectos de domos como lo fue la retícula geodésica.

1.2.Los materiales como factor en el desarrollo de los sistemas estructurales utilizados en las estructuras reticulares.

“Una de las ventajas que muestra el diseño y empleo de la estructura reticular triangular, es la flexibilidad en el uso de materiales para la solución estructural y proyectual de las diferentes formas geométricas, utilizando el desarrollo y evolución tecnológica que ha tenido a través de los años para el mejoramiento principalmente de las propiedades mecánicas” (Gonzalez Meza & Anaya Díaz, 2013). La forma y solución estructural de la retícula dependen del empleo correcto de los materiales y estudio de sus propiedades mecánicas, así como de la invención de nuevos materiales o el perfeccionamiento de las propiedades de los materiales ya existentes cuando el proyecto así lo requiera, un ejemplo es la Carbon Tower de Peter Testa donde propone el empleo de materiales perfeccionados para la solución de la estructura de su torre.

Madera.

La madera no es sólo el material más antiguo de los materiales estructurales que trabajan a tracción. La madera es un material único, en el hecho de que es producido por la naturaleza y por lo tanto un material renovable, con un potencial estructural listo para su uso y que no requiere de procesos de fabricación complejos, como es necesario para la producción de otros materiales estructurales de mediados del siglo XX (Michaels, 1950). En la actualidad los procesos han cambiado y han mejorado sus propiedades, hasta presentar una gran variedad de productos cuya materia prima principal es la madera o la celulosa.

La utilización de madera en estructuras reticulares no ha sido completamente desarrollada, pero su empleo en estructuras complejas empieza a ser más común, dado que el mantenimiento que requiere es una de las razones del porqué no es tan empleada con estos fines, donde actualmente los avances tecnológicos han permitido la creación de nuevos productos que minimicen los costos de mantenimiento. La aplicación de la madera como material estructural de grandes estructuras se limita principalmente a proyectos que se han dado en domos construidos en Estados Unidos y Japón (Gonzalez Meza & Anaya Díaz, 2013).

La madera se posiciona como uno de los materiales favoritos para la fabricación de estructuras reticulares en la segunda mitad del siglo XX: por la facilidad de su manufactura, la escases del acero en Estados Unidos después de la Segunda Guerra Mundial, sus propiedades mecánicas, por ser un material de fácil obtención, disminución de la mano de obra necesaria para su montaje, en disminución de los tiempos de construcción y fácil de adaptar a sistemas de unión que mejoren el comportamiento estructural. Las estructuras de madera a lo largo del siglo XX, muestran una gran flexibilidad para la creación de formas geométricas y de mallas generadas a finales de este siglo, formas que son capaces de cubrir grandes luces y generar formas geométricas complejas como los diseños propuestos por el arquitecto Shigeru Ban y el mismo Frei Otto.

La evolución de la madera a mediados del siglo XX es variada, un ejemplo es como lo fue el mejoramiento de sus propiedades por medio de la fabricación de

la madera contrachapada y de medidas estándar, o como con el mezclar las propiedades de otros materiales como las resinas sirven para la creación de un material que mezclado con la madera mejoren sus propiedades a tracción.

Ilustración 17 Campo deportivo del Montana State College, Wilson y Berg, Estados Unidos, 1957 (Timber, 1957).

Acero.

La introducción del hierro en la construcción de edificios empezó a principios del siglo XIX, dando comienzo a la nueva era en la construcción de estructuras. En su forma temprana (como hierro fundido), era relativamente débil trabajando a tracción; posteriormente el hierro forjado fue utilizado en conjunción con hierro fundido para compensar este defecto, pero el material muestra una falta de uniformidad. Fue sólo con su conversión en lo que llamamos el acero dulce, aproximadamente a mediados del siglo XIX, que el hierro estaba disponible como un material que tiene una calidad uniformemente adecuado para la aplicación de la ciencia mecánica (Michaels, 1950).

Su desarrollo como material de construcción inicia con la invención de convertidor de Henry Bessemer y la introducción del horno Siemens-Martín en 1864, empezando así la era del acero Siemens-Martín. Paralelamente a el desarrollo del acero había un fuerte auge de la producción de hierro, al progresar en la elaboración y conformación de este metal, así como el inicio del laminado de planchas de hierro en Inglaterra (Franz Hart et al., 1976).

A mediados del siglo XX, ya era un material estrictamente controlado, con características conocidas, y que tiene una elasticidad constante y uniforme, además está disponible en diferentes grados, hasta una fuerza de 5 o 6 veces la del acero dulce (Michaels, 1950). En la actualidad la tecnología nos ofrece una gran variedad de tipos de acero y perfiles prefabricados, que nos permiten mejorar la calidad de la estructura y del proyecto con una amplia gama de opciones, así como poder proyectar una gran variedad de formas que puedan dar soluciones variadas a los proyectos.

El acero es el material más usado para la construcción de las estructuras reticulares, además de ser el material ideal para este tipo de estructuras. Las estructuras reticulares triangulares de acero, emplean en su mayoría perfiles de acero, que serán atornillados, remachados o soldados entre ellos. Uno de los elementos importantes en el desarrollo de las estructuras reticulares metálicas son los nodos o conectores, donde hasta la actualidad se han desarrollado una gran variedad de soluciones (Gonzalez Meza & Anaya Díaz, 2013).

Ilustración 18 Centro de convenciones de Nevada, Estados Unidos, 1959 (Bethlehem, 1959).

Aluminio.

El aluminio en sí aparentemente se produjo por primera vez a mediados del siglo XIX, pero su utilización y resistencia no era muy grande, por lo que fue sólo con el desarrollo de la aleación de duralumin, en la primera parte del siglo XX que se obtuvo un metal con una resistencia adecuada para los propósitos estructurales que se requerían (Michaels, 1950).

A mediados del siglo XX, estudios mostraban muchas aplicaciones exitosas donde el aluminio estuvo listo para usarse como un material estructural, debido

a su alto ratio resistencia-peso, además de un rápido montaje y alta resistencia a la corrosión. Al igual que al inicio del acero, el aluminio mostro ser un metal caro de producir pero barato de fabricar (Prentice, 1952b).

Haciendo directo hincapié en los elementos y en la resistencia a la torsión hacen posible la construcción en acero. Barras, tubos y perfiles son los más usados para su construcción. Los conectores y uniones son varios para dar solución a los nodos prefabricados en los proyectos estructurales. Un ejemplo es el domo geodésico de la Ford Rotunda Building (Gonzalez Meza & Anaya Díaz, 2013).

Ilustración 19 Industria de Café S.A., Guatemala (MACOMBER, 1958).

Hormigón.

Aunque el hormigón fue virtualmente redescubierto unos cuantos años antes de la finalización del puente más antiguo de hierro fundido hacia finales del siglo XVIII, un centenar de años más tarde, el hormigón fue reforzado con acero, siendo usado en la construcción de estructuras. Por lo que el tiempo de construcción en hierro había sido ya altamente desarrollado y el uso temprano de hormigón armado tendía a seguir las formas perpetuadas en la construcción temprana de hierro, con columnas, vigas principales y vigas secundarias como elementos estructurales principales. Se observó, sin embargo, que por primera vez un material estaba disponible, y que por su naturaleza invitó a la concepción de una estructura como un todo y no como la suma de sus partes separadas (Michaels, 1950).

El hormigón reforzado con varillas o barras de acero, conformaron una mezcla resistente a tracción y compresión (flexión), patentado por José Monier y expuesta en la expo universal de París de 1867. Aunque es un material menos flexible y más pesado no impide sea utilizado para la construcción de estructuras reticulares, ya que sus propiedades mecánicas y maleabilidad permitían el diseño de estructuras de diversas formas geométricas.

El desarrollo de técnicas aplicadas al hormigón como la prefabricación, pretensado y postensado, han hecho posible el uso de elementos de un hormigón más ligero y secciones más pequeñas para la solución de estructuras reticulares, un ejemplo es el Hangar de Orvieto. A finales de 1970's, prácticamente desaparece el uso de este material para la construcción de estructuras reticulares, su empleo disminuye considerablemente, para ocupar las nuevas tipologías de estructuras ligeras metálicas aplicando materiales reformados e innovadores (Gonzalez Meza & Anaya Díaz, 2013).

Ilustración 20 Retícula de forjados de la Galería de Arte de la Universidad de Yale (de Jauréguiberry, 2011).

Plásticos.

En el mundo de la posguerra ante la carencia de materiales y mano de obra calificada, y con el desarrollo de las nuevas técnicas constructivas en conjunto con la prefabricación, los materiales plásticos se muestran como una opción en la construcción aplicando técnicas como la industrialización. Richard B. Fuller, experimentó con estos materiales en la fabricación de domos geodésicos para

optimizar su construcción y en muchos casos en propuestas aplicadas a vivienda.

Ilustración 21 Sistema de domo para casa habitación prefabricada, W. Pimpl y C. Stenzel (Pidgeon, 1971).

A finales de los años 1950's y principios de los años 1960's, se empezó a convertir en un material más empleado, debido a su alto ratio resistencia-peso, inclusive más alto que el acero, su alta resistencia a la corrosión y su fácil manejo para generar formas, haciéndolo adaptable a líneas de producción. El interés inicial por este material en la fabricación de las estructuras, fue despertando principalmente por la investigación de Monsanto Chemical Co., en especial a su casa del futuro de plástico Monsanto, construida en 1956, que consistía en 4 alas curvadas tipo cantiléver desde un núcleo central (Z. S. Makowski, 1963). También Monsanto Chemical Co., promocionó la fabricación de domos geodésicos bajo la licencia de Richard Buckminster Fuller (Prentice, 1961c).

Los plásticos tuvieron un positivo y rápido desarrollo como un material estructural hasta 1973, cuando el precio del petróleo se fue arriba dramáticamente y el auge de los plásticos colapso. La fibra de vidrio reforzada con poliéster y fibra de vidrio reforzada con cemento fueron composites mayormente desarrollados (Eekhout, 1989).

En la actualidad, los plásticos se han desarrollado para ser utilizados principalmente como materiales envolventes de estructuras, que cumplen con

propiedades mecánicas para soportar los empujes y movimientos a los que son sometidos las estructuras, así como las inclemencias del tiempo. También los plásticos se han convertido en un material con numerosas aplicaciones en las edificaciones aunque su uso estructural es limitado, siendo principalmente empleado como una piel de los proyectos, aprovechando así los avances tecnológicos que han creado una gran variedad de nuevos productos.

Ilustración 22 Unidades modulares de vidrio reforzado con poliéster por C.F. Taylor Ltd, Gran Bretaña (Z. S. Makowski, 1963).

Cartón y papel.

Al igual que los plásticos, el cartón se posiciona como una opción para la construcción de algunas propuestas estructurales como lo fueron los domos geodésicos de Richard B. Fuller, propuestas que en algunos casos buscaban ser empleadas para dar alojamiento a soldados como albergues provisionales. La construcción de albergues buscaba que estos fueran ligeros y resistentes, además de ser de fácil fabricación y montaje, así como el empleo en algunos ejercicios del papel como material envolvente de algunas de las estructuras de los domos geodésicos fabricadas con cartón (Mason, 1954).

Ilustración 23 Domo de cartón de R. Buckminster Fuller para la 10ma. Triennale de Milán (Pidgeon, 1955).

El cartón y el papel son materiales que se caracterizan por ser débiles a los fenómenos meteorológicos, por lo que requería de otros materiales que reforzarán sus propiedades mecánicas y físicas para resistir ante ellos, como lo son la lluvia, el viento, la humedad, etc. Estos materiales no plantearon una solución real por su misma fragilidad estructural y falta de resistencia al clima, pero mostraron posibles aplicaciones a las estructuras reticulares ligeras y donde la actualidad le podría presentar una nueva oportunidad.

Ilustración 24 Domo de cartón cubierto de poliéster, 1954 (Mason, 1954)

Textiles.

Con los avances tecnológicos en lo que se refiere a materiales, la utilización de textiles en la arquitectura se ha incrementado considerablemente en los años recientes al ser un material resistente y ligero, con el que se obtienen ahorros económicos y de materiales, además de reducción de secciones de los perfiles estructurales empleados. Este material se ha propuesto como material principal para la construcción de estructuras soportantes en un futuro, como ejemplo la Carbon Tower, donde un textil reforzado con fibras de carbono da la solución estructural al edificio (Gonzalez Meza & Anaya Díaz, 2013).

Al igual que materiales como el aluminio y plásticos, los textiles tienen un gran apogeo en el mundo de la posguerra ante la escases de materiales y mano de obra calificada para su producción como lo fue el acero. En el cual su mayor representante de las estructuras tensadas, el Arq. Frei Otto empieza a experimentar empleando cubiertas tensadas de textiles en los años 1950's, planteando una nueva propuesta de fabricación y solución a las formas de doble curvatura, que tanto gustaban a otros representantes como Félix Candela o Eero Saarinen, que utilizaban el hormigón armado como material principal.

Ilustración 25 Pabellón de música de la Federal Garden Exhibition, Kassel, Alemania, Frei Otto, 1955
(Warmbronn).

1.3.Nodos y sistemas reticulares modulares prefabricados.

Los sistemas reticulares prefabricados y de unión, han jugado un papel importante en el desarrollo de las estructuras espaciales y laminares de retícula triangular, logrando una fabricación, montaje y construcción eficiente de las estructuras ligeras, convirtiéndose así en uno de los factores más determinantes en el éxito de forma y comportamiento de una estructura. Siendo el desarrollo y patentado de los nodos de unión prefabricados, una característica importante que permitió una mayor evolución y transformación de las edificaciones empleando un sistema reticular posteriores a la Segunda Guerra Mundial, así como también el uso de materiales tubulares y perfiles como solución de las barras empleadas en de grandes estructuras, que en conjunto con los sistemas de unión prefabricados harían más eficientes y resistentes a las estructuras.

La unión de los elementos del reticulado en sus puntos de cruce tiene como consecuencia dar a la construcción un elevado grado de hiperestaticidad principalmente si la unión es rígida (Z. S. Makowski, 1968), contribuyendo a un mejor comportamiento de la estructura. Los nodos tienen doble cometido: la transmisión de esfuerzos a lo largo de la estructura y deben facilitar el proceso constructivo de la retícula estructural.

En las estructuras reticulares el tipo de unión dependerá principalmente de la técnica de conexión (atornillado, soldadura o el empleo de conectores especiales). También estarán afectados por la forma de los miembros (tubulares, perfiles o secciones especiales) que usualmente implica una técnica distinta de conexión, dependiendo de si los miembros de conexión son de sección hueca, formando una camisa estructural, ángulo o de pestaña ancha (Z. Makowski, 2002).

Pero retomando a uno de los elementos más importantes de los sistemas reticulares espaciales prefabricados y laminares, los nodos de unión se convierten en elementos estructurales, encargados de transmitir las cargas horizontales y verticales.

Es importante mencionar que el inicio de construcción de estructuras espaciales, en conjunto con los módulos prefabricados inventados por el Dr. Bell, Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Arquitectura – D.C.T.A.

marcarían el inicio de las nuevas propuestas estructurales y que posteriormente evolucionarían para la construcción de nuevas propuestas de formas geométricas. Posteriormente al Dr. Bell y al Dr. Matsushita en la primera mitad del siglo XX, empezaron a sufrir menos con el problema que la estructuras espaciales presentaban, siendo el gran sacerdote de este culto Konrad Wachsmann, quién con su sistema de unión para los paneles generales de madera prefabricadas a principios de los 1940's, fuera el hombre de esa época en contestar a la primitiva y tradicional unión. Aunque el mayor desarrollo de sistemas de unión inició con la comercialización del sistema MERO en 1942, consolidándose con investigaciones y desarrollos entre los años 1950's y 1960's del siglo XX.

El rendimiento de las conexiones y nodos estructurales de todos tipos ha sido el tema de investigaciones intensas durante los últimos años. Pruebas muestran que las conexiones soldadas en acero pueden desarrollar el 100% de eficiencia contra esfuerzos a tracción, la eficiencia de uniones con pernos y tornillos se asume usualmente alrededor del 75%. Las conexiones soldadas dan como regla el máximo de resistencia en estructuras espaciales de acero y son usadas para cubrir largas luces, pero por otro lado las conexiones soldadas extienden considerablemente el tiempo de montaje y requiere de la soldadores calificados, en cambio donde las estructuras son prefabricadas son montadas por mano de obra semi-especializada, convirtiendo a las conexiones atornilladas como las preferidas convirtiéndose en una de las razones del porque en los últimos años son montadas estructuras de grandes luces. (Z. Makowski, 2002).

Para el entendimiento de los nodos y módulos prefabricados de sistemas constructivos reticulares triangulares para construir estructuras ligeras, se podrán clasificar de la siguiente manera, tomando como base la clasificación propuesta por W. Schueller en su libro, ya que el desarrollo de los nodos garantizan el éxito del comportamiento estructural, construcción, costo y tiempo de montaje de las edificaciones.

Ilustración 26 Imagen de clasificación de nodos de unión (Diseño propio).

Con la clasificación y análisis de las articulaciones y barras de las diferentes estructuras, se determina que los sistemas de nodos de unión tanto prefabricados como especiales en conjunto con el tipo de secciones utilizados en las barras determinan la tipología de las articulaciones, siendo los nodos de unión prefabricados esféricos, cilíndricos, especiales y articulaciones sin nodo los predominantes en la actualidad, y los que determinaran la forma en conjunto en algunos casos con las barras, ya que estas pueden determinar el grado de inclinación de las uniones, especialmente las empleadas para desarrollar formas libres y complejas de la arquitectura contemporánea. Los materiales que principalmente serán usados son el acero, madera y aluminio, variando los materiales en el tipo de articulación y en algunos casos difiere del material empleado en las barras empleadas. La tipología de barras predominante son los perfiles y tubulares de diferentes secciones con una tipología de unión principalmente atornillada y soldada.

Tipo de nodo	Nodo placa plegada	Nodo cilíndrico	Nodo esférico	Nodo esférico hueco	Nodo multiplaca	Nodo esférico	Nodo atornillado
Ejemplo del sistema	Unistrut	Triodetic	MERO	Oktaplatte	Octatube	ORTZ	TRIDI-ARQME
Materiales de sistema							
Acero							
Madera							
Aluminio							
Hormigón							
plástico							
Papel							
Textiles							
Sección de Barras							
Perfiles							
Tubulares							
Perfil macizo							
Elementos que determinan la forma							
Nodo							
Barras							
Tipo de unión							
Tipo de unión							
Atornillado							
Soldado							
Ensartado							
Geometrías							
planas							
Curvas simples							
Formas complejas							

Ilustración 27 Características de sistemas de nodos (Diseño propio).

Tipo de nodo	Nodo multiplaca	Nodo cascaron	Nodo cascaron	Nodo cilíndrico	Nodo Esférico	Nodo especial	Articulación sin nodo
Ejemplo del sistema	Octet Truss	SDC	Nodus	Geométrica	Tuball	Swiss Re Tower	Canton Tower
Materiales de sistema							
Acero							
Madera							
Aluminio							
Hormigón							
Plástico							
Papel							
Textiles							
Sección de Barras							
Perfiles							
Tubulares							
Perfil macizo							
Elementos que determinan la forma							
Nodo							
Barras							
Tipo de unión							
Tipo de unión							
Atornillado							
Soldado							
Ensayado							
Geometrias							
Planas							
Curvas simples							
Formas complejas							

Ilustración 28 Características de sistemas de nodos (Diseño propio).

Los sistemas prefabricados de unión muestran un desarrollo y evolución a través de los años mostrando una gran variedad de opciones de metodologías de unión, fabricación, secciones y formas a través de los años, siendo las uniones esféricas, de placas, especiales de acero colado y cilíndricas las que siguen siendo empleadas en la actualidad en diferentes formatos, patentes y fabricantes, dando solución a diferentes formas aplicadas a las estructuras reticulares.

Ilustración 29 Diagrama de evolución de nodos de unión prefabricados (Diseño propio).

En esta sección se mostrarán una descripción de diferentes autores y revistas especializadas sobre los principales sistemas de unión a base de nodos prefabricados, además de sistemas constructivos a base de módulos prefabricados de estructuras reticulares triangulares para la construcción de diferentes proyectos en la segunda mitad del siglo XX. Es importante mencionar que durante el proceso de investigación se encontraron cientos de sistemas de unión por lo que se mencionaran algunos que la investigación determine

importante para poder entender el desarrollo de los sistemas de unión prefabricados adaptados a un sistema estructural.

1.3.1. Sistema MERO.

Aunque es un sistema de conexión diseñado y fabricado en la primera mitad del siglo XX, es importante tomarlo en cuenta ya que será el primer sistema comercializado en el año de 1942, el sistema MERO se desarrolló durante la Segunda Guerra Mundial por Max Mengerlinghausen (Chilton, 2000; Eekhout, 1989; Z. S. Makowski, 1968). Actualmente el sistema MERO consta de variantes según las necesidades de la estructura diseñada. La configuración de los entramados, en un principio plantean diseños limitados y formas geométricas planas, influenciada por las perforaciones de los ángulos del nodo MERO KK, aunque posteriormente con la evolución del nodo y el surgimiento de nuevas soluciones el sistema MERO se consolida para dar solución a cualquier configuración de entramados y forma geométrica diseñada, por lo que la única limitante de su empleo será la misma capacidad de arquitectos en ingenieros.

1.3.1.1. Sistema esférico MERO KK.

El sistema de conexión de tipo esférico MERO KK, como se le denomina en la actualidad, es el sistema original que consiste en una bola esférica tratada y fabricada de acero forjado en caliente con al menos 18 agujeros roscados en ángulos diferentes de 45°, 60° y 90°, los agujeros son perforados con precisión. La esfera tiene caras planas alrededor de los agujeros para mejorar el asentamiento. El tornillo que es insertado en el hoyo es parte del miembro tubular que pasa a través del cono soldado al final del tubo (Chilton, 2000; Ramaswamy, Eekhout, & Suresh, 2002). Las tipologías de mallas (principalmente ortogonales) y geometrías a desarrollar son limitadas, pero se plantean como precedentes para la evolución de las mallas y formas, ya que su desarrollo influencia en la invención de futuro nodos para el desarrollo de las formas libres.

Ilustración 30 Nodo MERO KK y elementos de unión
(Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

Ilustración 31 Nodo MERO KK estándar y barras de tubo (Chilton, 2000).

El proyecto más grande construido en su momento fue el West Berlin Interbau Exposition durante los años 1950's, época dorada del desarrollo de las estructuras reticulares, con dimensiones de 52 m x 102 m aproximadamente (Prentice, 1960b).

En la actualidad el sistema MERO KK puede ser fabricado con mayor precisión y funcionalidad, para la construcción de estructuras espaciales de doble o múltiple capa, además de permitir mayor libertad en el diseño de la forma de las estructuras.

El proveedor puede fabricar los nodos de unión en diferentes tamaños, con diámetros que van desde 46.5 mm a 350 mm. Una de las ventajas del conector

Ilustración 32 Detalles nudo de unión NK (Chen, 1997;
MERO-TSK, 2013).

MERO es que los ejes de todos los miembros pasan a través del centro del nudo, eliminando así la excentricidad de carga en la articulación, por lo tanto, la articulación trabaja sólo bajo fuerzas axiales. Entonces, las fuerzas de tracción se transmiten a lo largo del eje longitudinal de los tornillos y es resistida por los miembros a base de tubo a través de los conos finales de estos. Las fuerzas de compresión no producen tensiones en los tornillos y se distribuyen al nudo a través de los enchufes hexagonales de las puntas. El tamaño del tornillo de conexión de los miembros de compresión se basa en el diámetro del nudo calculado, a partir de que sus fuerzas internas pueden ser reducidos hasta de 6 a 9 mm (Chen, 1997).

1.3.1.2. Sistema de tazón MERO NK.

El sistema de articulación MERO NK, es un nudo semiesférico para conectar la cuerda superior y los miembros diagonales, donde se utiliza una sola conexión atornillada desde el nudo al miembro, es decir una conexión pin-articulado a los nodos. Los miembros de la cuerda superior son secciones cuadradas o rectangulares que pueden trabajar en cortante y van al ras de los nodos. Los nodos en tazón, se utilizan principalmente para estructuras planas y curvas de dos capas cubriendo grandes luces, en particular, se emplean en edificios irregulares en plano o en forma de pirámide. Es importante mencionar que las diagonales y cuerdas inferiores se construyen con en el sistema Mero

Ilustración 33 Detalles nodo de unión ZK (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

ordinario, con tubos circulares y nodos esféricos (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

Ilustración 34 Nodo MERO NK (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

1.3.1.3. Sistema de cilindro MERO ZK.

El sistema de articulación MERO ZK, es un nodo cilíndrico con conexión de atornillado múltiple, que puede transmitir de manera eficiente el momento a flexión. Por lo general, en el nodo pueden conectarse de 5 a 10 miembros de secciones cuadradas o rectangulares que pueden acarrear cargas transversales, donde el ángulo de conexión varía de 30° a 100° para un ángulo en U, y de 0° a 10° para un ángulo en V. Los nodos cilíndricos se utilizan en superficies de una o dos curvas, también para el desarrollo de cascaras en celosía de una capa con mallas trapezoidales y/o triangulares de luces pequeñas o medianas, se utilizan en proyectos donde se requieren conexiones rígidas a la flexión. El material de la envolvente son fijados directamente sobre los miembros (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

Ilustración 35 Detalles nodo de unión TK (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

Ilustración 36 Nodo MERO ZK (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

1.3.1.4. Nodo de disco cilíndrico MERO TK y el sistema MERO BK.

El sistema de articulación MERO TK, es un nodo en forma de anillo plano para la conexión de 5 a 10 miembros de secciones cuadradas o rectangulares, donde un solo tornillo se utiliza para conectar el nodo y el miembro, y la profundidad de nodo es igual a la sección miembro. Este sistema de unión puede transmitir los esfuerzos a cortante y resistir el pandeo. Posteriormente en el ángulo en U, se designa como el ángulo entre dos miembros conectados al mismo nodo. También, el ángulo en V, es el ángulo entre el eje de miembro y el plano normal del nodo, que es una medida de curvatura. Para el nodo de disco, el ángulo en U varía de 30° a 80° , y el ángulo en V varía de 0° a 10° . Este tipo de sistema de unión es esencialmente usado en conexiones de tornillo-articulado y es adecuado para las superficies curvas y cascaras reticuladas

de una capa, diseñados con mallas triangulares principalmente de pequeñas luces (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

Ilustración 37 Nodo MERO TK (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

El sistema MERO BK, es un nodo sólido en forma de bloques (prisma) conectando miembros de secciones cuadradas o rectangulares. El ángulo en U varía desde 70° hasta 120° , y el ángulo en V varía de 0° a 10° y puede ser utilizado para superficies de una curva o doblemente curvada, con conexiones tornillo-articuladas, o conexiones rígidas donde el número de miembros es pequeño. Finalmente la estructura posible es de geometría simple y de pequeñas dimensiones, de una o doble capa que puedan tener cambios bruscos de inclinación (Chen, 1997; MERO-TSK, 2013).

Ilustración 38 Nodo de unión MERO BK y elementos de unión (MERO-TSK, 2013).

Ilustración 39 Sistema Mobilar (II, 2002; Wachsmann, 1951).

1.3.2. Sistema Mobilar.

El sistema fue patrocinado por el Atlas Aircraft Corporation (Wachsmann, 1961), dando como resultado el sistema *Mobilar Structure*, que consiste en miembros tubulares de varios largos de sección circular o de largo estándar, placas con perforaciones oculares en offset soldadas en cada final del tubular, y que por su ratio de espesor entre las placas, las cargas transmitidas al conector son a través del perno de conexión, lo que causa una igualdad de estrés y tensión en cada placa con perforación para el ensamble. Las uniones permiten ensamblados en cualquier combinación de final de viga, columna, cuerdas, etc. Dependiendo del requerimiento de la estructura, su fabricación fue compleja aunque su montaje sencillo. Este sistema desarrollado por K. Wachsmann no tuvo el éxito comercial que se pretendía, aunque hubo un continuo desarrollo para mejorar su desempeño en proyectos posteriores. Esta invención, suministró un elemento para marcos estructurales completamente prefabricados, complementado con un sistema de vigas reticulares, y el cual la estructura puede ser rápidamente montado con mano de obra semi-calificada y sin la necesidad de soldadura, remaches o cemento, aunque proveyó un sistema firme, seguro y un marco confiable con una conexión de perno entre los elementos que lo constituyen, logrando al final en caso de ser necesario que se pueda desarmar fácilmente cuando se requiera (II, 2002; Prentice, 1960c; Wachsmann, 1951).

Ilustración 40 Sistema Mobilar (II, 2002; Wachsmann, 1951).

El sistema estructural Mobilar planteaba la intención de poder fabricar un sistema universal, que permitiera poder fabricar cualquier tipo de estructura con posterioridad, aunque lo limitaba a estructuras que transmitieran las cargas bidimensionalmente al formarse vigas reticulares triangulares, lo que limitaba su aplicación para el desarrollo de mallas principalmente ortogonales de dos capas y formas geométricas planas.

1.3.3. Sistema Unistrut o Moduspan.

El Sistema Unistrut se desarrolló en los Estados Unidos a principios de los años 1950's, siendo la consecuencia de un prototipo que fue diseñado por Charles W. Attwood bajo la dirección de Theodore Larson, profesor de arquitectura de la Universidad de Michigan, donde la articulación fabricada consistía en una placa de conexión que es formada por medio de un prensado a partir de chapa de acero, el sistema fue probado en la Universidad de Michigan en Ann Arbor en 1951, y en específico el sistema fue desarrollado para un edificio de investigación para la escuela de arquitectura en 1953.

Ilustración 41 Elementos del sistema Unistrut (Z. Makowski, 2002).

Los miembros son secciones fabricadas en frío en forma de canal y se sujetan a la placa de conexión mediante el uso de un solo tornillo en cada extremo. Los nodos de unión para las capas superior e inferior son idénticos, y por lo tanto las retículas de doble capa Unistrut consisten sólo de cuatro componentes, es decir, la placa de conexión, el miembro, el tornillo y la tuerca. La luz máxima para este sistema es de aproximadamente 40 m con módulos estándar de 1,2 y 1,5 m (Chen, 1997; Z. Makowski, 2002; Michigan, 1955).

Es importante mencionar que al voltear una oreja de la placa de unión permite que los miembros diagonales se sujeten tanto por dentro como por fuera de la cara de la placa, o dos miembros paralelos que se unan cuando una resistencia extra fuera necesitada (Michigan, 1955).

El nombre de Moduspan también se ha utilizado para describir el sistema Unistrut. En el sistema mencionado por Chilton en su libro, hay dos tipos de nodos de conexión, ambas formadas de una placa de 6 mm de espesor rolada en caliente habiendo perforado las orejas formando hoyos para tornillos para la conexión de los miembros (Chilton, 2000). Pero en base a la investigación realizada el sistema Moduspan evolucionado del sistema Unistrut propuesta por Chilton en su libro, es un sistema genérico cuya base de diseño puede ser el sistema inventado por Attwood.

Ilustración 42 Sistema Moduspan (Chilton, 2000).

Aunque el sistema Unistrut nunca salió a la venta, la sencillez de su fabricación y montaje, iniciaron una tendencia de fabricación de nodos a base de placas que optimizaran la fabricación de estructuras reticulares espaciales por medio de un método que no requiere de máquinas especializadas para su fabricación y nodos de unión macizos de mayor peso. Las configuraciones de los entramados se limitan retículas ortogonales de dos capas y al desarrollo de formas planas. Es importante mencionar su empleo para dar solución a estaciones de metro en la Ciudad de México, ante la facilidad de su fabricación, transporte y montaje.

Ilustración 43 Sistema de unión Unistrut (Z. Makowski, 2002; Michigan, 1955).

1.3.4. Sistema Octet Truss.

El sistema Octet Truss fue diseñado e inventado por Richard B. Fuller a principio de los años 50's, utilizado para el desarrollo por medio del diseño de un nodo y al mismo tiempo módulo, que permitía la fabricación de estructuras de vigas

ligeras basadas en formas de octaedros y tetraedros para la formación de su retícula. El nodo de unión y módulo de este tipo de estructuras espaciales era por medio de placas de acero y barras tubulares de sección circular que en su punta se atornillaba a los nodos de unión, aunque en la solución empleada en el Ford Rotunda fue diferente, ya que emplea perfiles de aluminio y un nodo totalmente atornillado. El sistema no fue muy aceptado por el mercado norteamericano, por lo que no tuvo el éxito comercial para su fabricación, pero el empleo en la solución del domo geodésico le da el reconocimiento de los investigadores. Este sistema se plantea principalmente para la fabricación y construcción de estructuras espaciales planas de doble capa y de luces estándar, empleando una configuración de entramado de tipo ortogonal.

Ilustración 44 Sistema de unión Octet Truss (Prentice, 1960c).

1.3.5. Sistema Space Deck.

El sistema Space Deck fue desarrollado por la firma inglesa Denings of Chard y fue usado a partir del año 1954, el sistema consiste principalmente en pirámides rectangulares invertidas prefabricadas de acero, donde los marcos son unidos por medio de un nodo atornillado, empleando 3 tornillos por lado, las cuatro diagonales fueron fabricadas de varillas o barras de acero de alta resistencia a la tensión que estaban soldadas a las esquinas del marco de ángulo. Dos tipos de barras son usadas para la fabricación del módulo, la principal unión de barras son atornilladas directamente a los nodos y las barras secundarias son

atornilladas por medio de un conector cople hexagonal al nodo. Las medidas del módulo en la retícula cuadrada son de 1.20 m x 1.20 m y con una altura de 1.20 m o 0.75m. El costo del sistema era el más barato en comparación con cualquier otro sistema para fabricación de techos planos, lo que era comparable de manera muy favorable con las fábricas que emplean vigas estándar en su estructura. Con el sistema Space Deck fueron posibles luces de hasta 30 metros aplicados a puentes, techos, casa tropicales y cualquier estructura de grandes luces como hangares (Chen, 1997; Chilton, 2000; Hennessey and Partners, 1955; Z. S. Makowski, 1990; Ramaswamy et al., 2002).

Ilustración 45 Detalles sistema de unión Space Deck
(Chen, 1997; Z. Makowski, 2002; Chilton, 2000).

Ilustración 46 Sistema de unión Space Deck (Chen, 1997; Z. Makowski, 2002).

Ilustración 47 Detalle de unión SDC (Narayanan, 2006).

1.3.6. Sistema SDC.

La articulación SDC fue desarrollada por el diseñador francés Stéphane du Château en el año de 1957. El nodo se compone de dos cascaras prefabricadas, que cuando son soldadas juntas, tienen seis aberturas circulares para permitir la conexión por soldadura de seis unidades tubulares en el mismo nodo. Los componentes tubulares pueden deslizarse en el nodo permitiendo una cierta cantidad de ajuste de inclinación antes de ser soldados, lo que permite un cambio gradual de la curvatura de la superficie de la estructura. La soldadura aplicada en sitio de los nodos y las barras, fue considerada de alto costo, aunque permitía ahorros en los materiales tubulares empleados. Debido al hecho de que los nodos son soldados de manera rígida a los tubulares, su efectividad se reduce gratamente a la longitud de pandeo, con la reducción correspondiente de su tendencia a pandearse a compresión, da como resultado que su coeficiente de torsión es muy alto, también debido a lo fijo de la terminación de los tubos. Se utilizó principalmente y con mucho éxito para cúpulas y bóvedas cañón reticulares de una y doble capa.(Chilton, 2000; Z. Makowski, 2002; Z. S. Makowski, 1990). La configuración del entramado se limita a retículas de tipo triangular para el desarrollo de cubiertas de poca curvatura, aunque el empleo de este nodo marca un punto en los años 1950's donde los tubulares vuelven a tomar fuerza en su empleo y fabricación, que combinado con un nodo prefabricado soldado a los tubulares, surge como un sistema constructivo que gusta a

Ilustración 48 Sistema de unión Oktaplatte (Chen, 1997; Soddu & Colabella, 1998).

Ilustración 49 Nodo de Aeropuerto Internacional de Shenzhen (Pagani, 2014).

ingenieros y arquitectos por las uniones rígidas para el diseño de estructuras reticulares ligeras.

Ilustración 50 Sistema de unión SDC (Z. S. Makowski, 1990; Morineau, 2012).

1.3.7. Sistema Oktaplatte.

El Sistema Oktaplatte, fue diseñado e inventado por el Ing. Josef Fröhlich de la firma Manesmann a finales del año 1959, el sistema utiliza esferas de acero huecas y barras de tubo de sección circular que están conectadas por soldadura, los nodos forman principalmente octaedros. El nodo está formado por dos cascaras hemisféricas soldadas juntas, que están fabricadas de placas de acero, ya sea por prensado en caliente o en frío. La esfera hueca puede ser reforzada con un diafragma anular. Este tipo de nodo era popular en la etapa inicial de desarrollo de estructuras espaciales, también es útil para las estructuras de grandes luces donde otros sistemas utilizados están limitados por su capacidad de carga. En el sistema se utilizan esferas huecas con un diámetro de hasta

500 mm y se pueden aplicar a cascaras en celosía de una o dos capas. La articulación se puede considerar como semi o totalmente rígida (Chen, 1997; Z. S. Makowski, 1968). La configuración de los entramados será principalmente ortogonal y triangular en 2, 3 o 4 direcciones principalmente, su diseño permite una variedad de formas y diseños. En la actualidad una variedad de propuestas similares se han desarrollado permitiendo formas libres teniendo como ejemplo esta el Aeropuerto de Internacional de Shenzhen.

Ilustración 51 Sistema de unión Oktaplatte (Chen, 1997; Soddu & Colabella, 1998).

A este sistema, la firma Mannesmann le realizaría una adaptación al nodo insertando tornillos a la barra, denominándola Okta-S.

1.3.8. Sistema Triodetic.

El sistema triodetic fue desarrollado durante los años 1950's por la compañía Fentiman Bros, introducido comercialmente en el año de 1960 en Canadá. Uno de los pocos sistemas que usa predominantemente el aluminio como material de fabricación para las barras y nodos, fue desarrollado cuando el uso del acero en Canadá fue prohibido (Chilton, 2000). Es importante mencionar que Arthur E. Fentiman, no pensó únicamente en el empleo de aluminio como material para la fabricación del nodo, ya que ante el desarrollo de los nuevos materiales de la época como plásticos y aleaciones son propuestos en su patente para el uso en estructuras. El sistema es principalmente empleado para la construcción de envoltorios (Fentiman, 1959).

Ilustración 52 Detalles sistema de unión Triodetic
(Chen, 1997; Fentiman, 1959).

Ilustración 53 Sistema de unión Triodetic (Chen, 1997; Fentiman, 1959).

El nodo más conocido en forma de cilindro sólido es el sistema Triodetic, aunque el sistema de Geométrica ha tomado fuerza en el mercado internacional en los últimos años. El sistema Triodetic consiste en una sección extruida de aluminio con ranuras longitudinales, en el que son engarzados los extremos dentados de las barras tubulares huecas, donde se pueden acomodar 12 miembros por nodo (Chilton, 2000; Ramaswamy et al., 2002). Los nodos no son la unión débil, porque los cilindros son producidos por extrusión o fundición, los nodos pueden ser diseñados para sostener miembros en cualquier ángulo, por lo tanto el sistema puede adoptar cualquier forma, característica que sería empleada para el desarrollo de la primera estructura de forma libre. Los miembros no son soldados, atornillados o remachados al nodo por lo que su montaje se facilita considerablemente (Prentice, 1963b). Los módulos

que se forman pueden variar en tamaño, en una o dos capas, dependiendo de la necesidad de la forma, dimensiones de luces de la estructura a construir.

Originalmente sólo se construyeron estructuras de aluminio con este sistema, pero las estructuras espaciales de los últimos años con el sistema Triodetic que se están levantando, utilizan tubos de acero y cubos de aluminio, ya que las pruebas prácticas mostraron que el uso de dos materiales diferentes no implicaba ninguna dificultad electrolítica (Z. Makowski, 2002). La configuración de las mallas da solución a estructuras de doble capa y una gran variedad de retículas, este sistema constructivo prefabricado para estructuras se considera uno de los precursores de las formas libres aplicadas a estructuras reticulares con las propuestas realizadas por el Ing. Francisco Castaño en México, al aprovechar la ventaja que proporciona el sistema al permitir cortes en las barras en diferentes direcciones. Esta ventaja también sería aprovechada por su hijo para inventar su propio sistema y dar solución a una gran variedad de formas en diferentes partes del mundo.

Ilustración 54 Sistema Triodetic (Chilton, 2000).

El nodo del sistema Triodetic sería posteriormente la base para el diseño de varios sistemas prefabricados, desarrollados por diferentes investigadores y desarrolladores, variando principalmente dependiendo del fabricante en el tipo de ranurado del nodo o los materiales empleados, sobresaliendo el ya mencionado nodo de Geométrica.

Ilustración 55 Detalle tridilosa (H. Castillo Juárez, 2013).

1.3.9. Sistema Tridilosa.

El sistema Tridilosa fue desarrollado en el año de 1962 por el ingeniero Heberto Castillo Martínez. Desde el año de 1965 se llevó a la práctica en diversas construcciones en México, destacando el Hotel México, hoy World Trade Center (H. Castillo Juárez, 2013). Aunque el sistema es único, se observa una similitud con el sistema *Tetrapods* de hormigón.

El sistema estructural Tridilosa es un sistema estructural tridimensional mixto fabricado de acero y hormigón, es la conjunción de trabajo entre una estructura de acero tridimensional y una losa plana de hormigón que se integra en ella como una dovela, trabajando principalmente a compresión en la parte superior de la Tridilosa con una capa de hormigón de 5 cm de espesor aproximadamente, que sirve de elemento resistente a la compresión, convirtiéndose en un sistema tridimensional capaz de funcionar como forjado de entrepiso, sumando así las virtudes y bondades de ambos sistemas, eliminando en lo general las imperfecciones y carencias de ambas; en el caso de la losa de hormigón, el material inerte y su peso; en el de la estructura de acero, sustituyendo la compresión horizontal por hormigón en vez del acero (H. Castillo Juárez, 2013; J. Castillo Juárez).

Su principio de funcionamiento es sencillo, se considera la flexión, la torsión y la cortante. El hormigón toma los esfuerzos a compresión en la cuerda superior o inferior en caso de una inversión de momentos, la tensión generada es tomada por el acero, la torsión con el armado transversal y el

cortante con las diagonales del armado espacial, empleando diferentes perfiles de acero (H. Castillo Juárez, 2013; J. Castillo Juárez).

Ilustración 56 Tridilosa. a) Gran salón del centro de convenciones de Tabasco, b) Puente vehicular Las Flores, Chiapas (H. Castillo Juárez, 2013).

La versatilidad de este sistema constructivo reticular ha permitido su empleo en la construcción de diferentes tipos de edificaciones, principalmente edificio y puentes tanto peatonales como vehiculares, además de domos, bodegas y astilleros flotantes (H. Castillo Juárez, 2013; J. Castillo Juárez).

La diferencia principal con las losas de hormigón armado, es que la Tridilosa no contiene hormigón de relleno como las losas tradicionales. Se ahorra así hasta el 66% del hormigón, disminuyendo el peso propio de la losa o trabe y por consiguiente el peso del acero. Las diagonales se colocan entre las dos capas formando pirámides. El nodo se forma mediante una placa de acero que tienen como función conectar las diagonales entre sí, y para unir las a las barras que soportan la tensión. La soldadura debe ser suficiente para transmitir la fuerza que soporta el perfil angular (H. Castillo Juárez, 2013).

Ilustración 57 a) Centro social y de usos múltiples, Tabasco; b) Puente vehicular Las Flores, Chiapas (H. Castillo Juárez, 2013).

Ilustración 58 Uniones soldadas de varillas corrugadas con platinas de acero (H. Castillo Juárez, 2013).

Las ventajas que se obtienen con este sistema empleado en forjados planos intermedios y de azotea son las siguientes (H. Castillo Juárez, 2013):

- La transmisión de las cargas está plenamente definida.
- Todos los elementos pueden ser diseñados independientemente unos de otros y por ello hacerlos trabajar con el máximo esfuerzo.
- El peso propio de las partes estructurales es sobre el 50% de las losas planas.
- Se forma un espacio de aire térmico y acústico.
- Es un sistema que a medida que aumenta el peralte disminuye el peso.

Es importante mencionar que el sistema Tridilosa, no es el único sistema espacial empleado para dar solución a forjados de entrepiso, capaz de transmitir sus cargas y esfuerzos generados a través de sus elementos estructurales al mezclar acero y hormigón para su fabricación. La invención de la patente del Ing. Castillo, planteó una nueva posibilidad de dar solución a los forjados de edificaciones sin apoyos intermedios con una astuta combinación de materiales.

1.3.10. Sistema Nodus.

El sistema de unión Nodus, es un producto ingenieril de precisión que fue desarrollado por Hugh Walker de la *Tubes Division of the British Steel Corporation* en los finales de los año 1960's e introducido comercialmente a principio de los años 1970's, sus principales ventajas fueron que pueden aceptar ambas secciones tubulares, tanto

Ilustración 59 Detalle sistema Nodus (Chen, 1997).

cuadradas como redondas y que el revestimiento puede ser reparado acorde a las cuerdas (Chilton, 2000; Eekhout, 1989; Ramaswamy et al., 2002), pero con la desventaja de ser un sistema cuyo ensamblado es complicado, ya que usa partes complejas, y los conectores especiales de unión del extremo de acero fundido son soldadas a tope de la cuerda y los miembros de refuerzo de la red se instalan en plantillas de fabricación para asegurar la exactitud dimensional de los componentes de la armadura (Chilton, 2000).

El nodo de unión se compone de dos cascaras de acero fundido con dientes, fabricados mecánicamente y que se ajustan exactamente a los 4 extremos de las barras horizontales, donde los miembros de la cuerda son conectados rígidamente en el nodo, y en los nodos regulares se pueden conectar un máximo de 8 barras. (Eekhout, 1989). En la articulación completa, los ejes centroidales de las diagonales se cortan en un punto que generalmente no coincide con los correspondientes puntos de intersección de los miembros de la cuerda. Esta excentricidad produce una cierta cantidad de flexión local en los miembros de la cuerda y los componentes de la junta, que se muestra en las pruebas destructivas de carga, realizadas a las articulaciones y que suelen dar lugar a fallos debidos a la flexión de los dientes en el medio de la cascara del nodo principal (Chen, 1997). El sistema Nodus ha sido utilizado principalmente en la construcción de retículas horizontales de doble capa, que se puede adaptar

a una variedad de aplicaciones, incluyendo mallas verticales, inclinadas o de múltiples capas. La retícula que puede formar, varía de retículas triangulares, cuadradas, rectangulares y hexagonales, para finalmente desarrollar una gran variedad de formas geométricas en la estructura. Estas aplicaciones son particularmente eficaces en las cubiertas de salas de exposiciones, centros comerciales, museos o edificios similares, donde la estructura está expuesta o vista a través de acristalamiento (Z. Makowski, 2002; Z. S. Makowski, 1990), actualmente ya no está disponible para su venta. Las mallas que se podían realizar con este sistema eran retículas ortogonales de 2 capas, sus formas desarrolladas se limitaban a estructuras planas.

Ilustración 60 Sistema de unión Nodus (Chen, 1997; Z. Makowski, 2002).

1.3.11. Sistema Unibat.

El sistema modular Unibat, fue desarrollado en Francia por S. du Château a mediados de los años 70's, siendo este el sistema más exitoso que él desarrolló, se compone de unidades piramidales, estableciendo la capa superior fijada sobre una malla diagonal con la capa inferior, formando una retícula tridimensional estable. La corta longitud de los miembros de la cuerda superior da como resultado el empleo de menos material requerido, estos miembros fueron diseñados para resistir la compresión aplicada y los esfuerzos de flexión. Las unidades modulares estándar, están conectadas a las unidades adyacentes

por medio de un solo tornillo de alta resistencia a la tracción en cada esquina superior. La capa inferior está formada por una malla de dos direcciones de secciones tubulares circulares huecas, que están interconectados con el vértice a las unidades piramidales por un solo tornillo vertical. El sistema utiliza cualquier tipo de sección estructural para la formación de las retículas, ya sea perfiles huecos o perfiles laminados ya sea por separado o combinados. Su empleo fue aplicado para una gran variedad de proyectos de estructuras planas de dos o más capas, como escuelas, edificios de múltiples pisos, estructuras de grandes luces para estadios, albercas, etc. (Chen, 1997; Eekhout, 1989; Z. Makowski, 2002; Z. S. Makowski, 1990). Con este sistema constructivo prefabricado se plantea una configuración de mallas de tipo ortogonal, el diseño de formas planteadas son principalmente planas lo que limita la geometría de las propuestas.

Ilustración 61 Sistema de módulos UNIBAT (Zacharz, 2005).

1.3.12. Sistema Octatube y Tuball.

El Ing. Mick Eekhout inventó el sistema de estructura espacial Octatube en la época de sus exámenes finales en el año de 1973. Consiste en una base hexagonal plana el cual son soldadas 2 placas semi-octogonales colocadas en el ángulo correcto una con otra. El conector Octatube es una placa conectora y

Ilustración 62 Detalles sistema de unión Octatube
(Ramaswamy et al., 2002).

las barras usualmente tubos circulares que son unidos al nodo, aplanados y conectados por tornillos de alta resistencia, permitiendo un máximo de 18 barras de unión para ser empleadas principalmente en cubiertas planas. Al igual que el sistema Unistrut, el sistema Octatube limita la configuración de las mallas a retículas ortogonales de 2 capas, la generación de formas son exclusivamente planas.

Ilustración 63 Sistema de unión Octatube (Ramaswamy et al., 2002).

El sistema Tuball fue desarrollado por la empresa Octatube, inventado en el año de 1984 por el Ing. Mick Eeckhout, el sistema consta de nodos de acero en forma de esferas huecas y tubos circulares, una cuarta parte de la esfera comprende una tapa y el resto a una taza.

El sistema está formado por tapones con orificios roscados que se colocan en los elementos

Ilustración 64 Sistema de unión Tomoe Uni- Truss (T. Corporation).

tubulares, y los nodos esféricos están unidos a estos con tornillos y tuercas. Las tuercas son insertadas desde adentro de la esfera en el final de las barras. Los diversos componentes del sistema pueden ser fabricados en acero o aluminio. El sistema Tuball es altamente abstracto en su apariencia. La empresa Octatube sigue haciendo uso regular del sistema Tuball desde el primer año de su fabricación (Eekhout, 1989; Octatube; Ramaswamy et al., 2002). El sistema prefabricado de unión se plantea como una solución versátil a poderse adaptarse a diferentes soluciones de mallas y formas geométricas, la forma libre se plantea como una solución posible.

Ilustración 65 Sistema de unión Tuball ("Kartonnen vakwerk Hockey & Tennis Club Ring Pass in Delft door Octatube," ; Ramaswamy et al., 2002).

Ambos sistemas diseñados y patentados por el Ing. Eekhout, son muy distintos en su proceso de diseño, fabricación y montaje, por lo que pueden ser diseñados distintos proyectos estructurales y contruidos con los nodos, ya que su comportamiento ante los esfuerzos y distribución de las cargas es distinto.

1.3.13. Sistema Tomoe Uni-truss.

El sistema Tomoe Uni-truss es producido y vendido por Tomoe Corporation, desarrollado en el año de

Ilustración 66 Detalles sistema de unión Tuball
(Ramaswamy et al., 2002).

1992. Este sistema tiene un cono final, el cual tiene una terminación hexagonal que es soldado al final de un tubular de acero resistente al pandeo. La barra es formada por un tornillo, el cual tiene un mango hexagonal y dos cuerdas finales de diámetros diferentes, ambas tratadas en el mismo sentido, la cuerda final más delgada del tornillo es atornillada al final de cono de la barra, y la otra cuerda final en las perforaciones de las uniones de bola. Los tornillos en los dos extremos de un miembro de la estructura, tienen las cuerdas en sentido opuesto una de otra, y por eso, el miembro de la estructura por sí mismo tienen tornillos opuestos y sus dos terminaciones constituyen un cierto tipo de tensor que se puede ajustar.

Ilustración 67 Sistema de unión Tomoe Uni- Truss (T. Corporation).

Este sistema por lo tanto tiene un mecanismo de ajuste para posibles errores en la distancia entre las uniones de las bolas, conduciendo o atornillando la cuerda del tornillo de conexión con la bola de unión, por lo que el tornillo es apretado, pero la conexión entre el tornillo y el final del cono esta suelto. El

Ilustración 68 Sistema de unión Geométrica (Castaño, 2001a, 2001b; Geometrica).

tornillo de fijación, el cual es conducido a través de la perforación tratada al final del cono en una dirección, provocando que el cono presione al tornillo para prevenir la rotación de los miembros de la estructuras alrededor del tornillo. Con este sistema se puede generar cualquier forma arbitraria o de forma libre, formada por módulos de pirámide triangular o tetraedro y pirámides de forma cuadrada, cuya estructura es extremadamente ligera y de gran rigidez disminuyendo los tiempos de montaje en sitio al no necesitar de trabajos de soldadura, las configuraciones de mallas empleadas pueden ser variadas (T. Corporation; Kawaguchi, 1988).

1.3.14. Sistema Geométrica.

Diseñado a principios de los años 1990's, "el sistema de construcción Geométrica es versátil. Está compuesto de una conexión extruida, universal y fuerte; módulos a escala humana; volumen de empaque denso, y una fácil instalación que requiere el uso mínimo de equipo. Estas virtudes permiten formas ilimitadas. Y la adecuada selección de formas resulta en una estructura hermosa, eficiente, y de amplia extensión" (Geometrica).

Las estructuras que emplean el sistema Geométrica están construidas con tubos ligeros y resistentes de aluminio o acero galvanizado prefabricados mediante un sistema de manufactura computarizado, y se conectan en sitio mediante conectores de aluminio. La conexión de tubos y conectores es compacta, simple y en extremo eficiente, sin necesidad de soldadura. El conector

es un cilindro extendido de aluminio, con varias ranuras dentadas, similar al sistema Triodetic. Cada tubo está formado en las puntas en una figura lineal que puede deslizarse en la ranura del conector. Cuando todos los tubos se ha ensamblado en un cierto conector, la unión se completa con arandelas y un sólo tornillo. Una vez que se ha completado el ensamble, éste es fuerte, en ocasiones aún más que la unión de los mismos tubos. Los tubos resisten momentos de flexión en la unión. Esto permite a la cubierta o revestimiento de la estructura estar fija directamente a los miembros de la estructura, sin polines estructurales secundarios que pueden ser tan pesados como la estructura misma, en otros sistemas de construcción. Lo anterior también permite muchas variaciones a las geometrías básicas que no son posibles con conexiones de tornillos o soldadas. Y de manera única entre los sistemas de marcos espaciales, el de Geométrica permite la transferencia de momentos a través de la unión. Esto permite el apoyo de la cubierta directamente al marco espacial, sin la necesidad de utilizar elementos adicionales de apoyo estructural que generalmente son tan pesados como el marco mismo. Esto también permite la creación de superficies delgadas de doble curvatura que pueden librar claros de hasta 300 m (Geométrica).

Ilustración 69 Sistema de unión Geométrica (Castaño, 2001a, 2001b; Geométrica).

El sistema patentado por Geométrica, se presenta como una variante al sistema patentado Triodetic, posiblemente ante la cercanía del Ing. Francisco Castaño padre con el Ing. A. Fentiman, además de los conocimientos adquiridos

Ilustración 70 Sistema de unión Tomoe Uni Individual, Japón (T. Corporation).

Ilustración 71 Sistema de unión TM Truss (Kawaguchi, 1988).

por el Ing. Francisco Castaño hijo, lo que le permitió hacer modificaciones al nodo Triodetic (Castaño, 2001c), modificaciones que permitieran la aceptación de otros materiales diferentes al aluminio y adaptarlo a nuevas propuestas en una y dos capas, logrando la generación de sistemas de formas geométricas libres que Geométrica denomina Freedom e Hyparware. El sistema Geométrica se ha consolidado como una de las propuestas mejor desarrolladas para construir, y adaptarse a los nuevos retos tecnológicos y de formas que generan la arquitectura e ingeniería en la actualidad.

1.3.15. Otros sistemas.

Los sistemas reticulares prefabricados de unión y modulares, cambio iniciado por el sistema MERO que se han consolidado en los últimos 50 años, como una solución estructural a las mallas que se pueden fabricar basadas en el diseño de formas geométricas variadas y una diversidad de proyectos alrededor del mundo. Son cientos de patentes, propuestas de uniones y módulos prefabricados que se han registrado, por lo tanto difícilmente se pueden mostrar la totalidad de ellos en esta investigación, pero es importante mencionar el desarrollo que estos sistemas han sufrido y su importancia para la construcción y diseño de los sistemas reticulares, siendo Japón, Europa y Norteamérica, donde se ha mostrado un mayor desarrollo en las tecnologías de sistemas de unión y modulares prefabricados.

Ilustración 73 Sistema de unión H Diamond Shell, Japón (T. Corporation).

Ilustración 74 ABS Space Frame, Jordania (Specialist, 2015).

Ilustración 72 Sistema espacial de hormigón Tetrapods, Texas Instruments Building (Mason, 1958a).

Es importante mencionar al sistema *Tetrapod*, ya que fue un sistema de estructuras espaciales de hormigón premezclado. En las cuerdas inferiores de la estructura espacial tiene cables pretensados para absorber los esfuerzos a tracción, y en la parte superior el forjado de hormigón actuaría como cuerda superior absorbiendo los esfuerzos a compresión y las diagonales absorben los esfuerzos a cortante.

Como ya se había mencionado la cantidad de patentes y licencias de sistemas de unión y modulares prefabricados alrededor del mundo llegan a ser cientos, por lo que se enumeran algunos:

- Sistema Up-Right, desarrollado en Estados Unidos.

Ilustración 75 Sistema de unión NS space truss, Japón
(Chen, 1997; Kawaguchi, 1988).

Ilustración 76 Sistema de Unión Spherobot, Francia
(Motro, 2013; Zacharz, 2005).

- Sistema Met-Ram, desarrollado por la firma Booth Trading Co en colaboración con Z. S. Makowski.
- Sistema Steel Lattice Shell, patentado por S.G.B. y MRS Lenkins.
- Sistema Wuppermann, desarrollado por la firma de Theodor Wuppermann.
- Sistema Streamline, desarrollado por Mick Eeekhout.
- Sistema ABBA space, desarrollado por ABBA space structures.
- Sistema de unión Ortiz.
- Sistema PG, desarrollado por PG Structures Inc.
- Sistema TORUS, introducido en Yugoslavia.
- Sistema Tridi-2000, desarrollado en Francia.
- Sistema Power-strut
- Sistema Newbat
- Sistema Cubic Space.
- Sistema Neck.
- Sistema Hünnobeck.
- Sistema Schlink
- Sistema Blumfield.

Ilustración 78 Sistema de unión TRIDAMATEC, Francia
(Z. Makowski, 2002).

Ilustración 77 Sistema de unión OCTA HUB, Estados Unidos (Wendel, 1984).

Ilustración 79 Sistema modular PYRAMITEC, Francia
(Chilton, 2000; Z. Makowski, 2002).

1.4. La forma geométrica como un factor en el desarrollo de las estructuras reticulares.

Al observar a las retículas propuestas como una característica determinante en el desarrollo de estructuras ligeras, se determina una serie de factores que van a ser influidos para establecer con éxito el progreso de un proyecto, estos factores principalmente son geométricos influidos por el sistema estructural utilizado, convirtiendo su entendimiento de estos factores en un componente necesario para la propuesta de futuros proyectos.

La forma geométrica que se diseña tendrá un papel importante en el empleo y diseño de la retícula seleccionada, donde su entendimiento y clasificación ayudarán en un correcto análisis del comportamiento estructural, como base de la tipología geométrica de análisis, por lo que se tomará en cuenta la siguiente clasificación para poder determinar las técnicas de generación de la forma en base a las tipologías observadas en los proyectos realizados en el periodo de tiempo que comprende la investigación (Gonzalez Meza & Anaya Díaz, 2013):

- Formas poliédricas.
- Superficies de rotación y traslación.
- Superficies complejas de forma libre.

En lo que se refiere a la clasificación de la retícula, es necesario entender como el entramado formado afectará a la forma geométrica diseñada y en su comportamiento estructural. La retícula triangular será la mayormente utilizada por las tipologías de mallas en el diseño de estructuras, principalmente por las características geométricas de la forma triangular, pero es importante tomar en cuenta que la conformación del entramado usando el triángulo como su base geométrica para el suavizado de curvas tendrá muchas variantes que afectarán el comportamiento de las estructuras, y es en el nodo y las barras donde la solución será posible.

Los reticulados triangulares de tres direcciones son normalmente más económicos que las retículas en 2 direcciones para estructuras planas, y muchas veces también en las otras formas geométricas que se diseñan en los diferentes

proyectos, como lo son las configuraciones para bóvedas cañón y domos. La configuración normalmente escogida es el triángulo equilátero para los reticulados de las estructuras de geometrías regulares, pero en muchas otras, donde en la actualidad el empleo de los tres tipos de triángulo para la generación de la forma su empleo se vuelve más común ante la complejidad de los nuevos proyectos.

Diversos autores e investigadores clasifican las estructuras reticulares espaciales en base a su forma geométrica que es generada en la estructura, influenciadas por las retículas que se emplean para su diseño y construcción, por lo tanto la clasificación se resume de la siguiente manera:

- Estructuras planas. Son estructuras de forma plana, todas aquellas donde algunos de sus elementos estructurales se encontrarán sobre un mismo plano, y otros estarán dispuestos siguiendo diferentes direcciones en el espacio, formando estructuras espaciales reticulares.
- Estructuras tipo bóveda de cañón. Son estructuras que por su estructura misma son análogas a una delgada vela y que está formada por una red de barras o tubulares. Son generadas sobre una superficie de traslación formadas en el plano normalmente por un arco, que es trasladado sobre una línea colocada desde su punto de inicio.
- Estructuras tipo cúpulas. La cúpula es una de las formas más antiguas construidas, donde gracias a su doble curvatura, se presenta como una de las formas más adecuadas para poder cubrir grandes luces, Las cúpulas de entramado están formadas principalmente por elementos colocados sobre una superficie de revolución generado en el plano por un arco rotado sobre un eje, o con piezas rectas cuya intersección está sobre esta superficie.
- Estructuras de forma libre. Dentro de las formas libres podemos incluir las que son libremente trazadas por el arquitecto, aquellas cuya definición es independiente de criterios que no sean puramente formales, las que son generadas aleatoriamente y finalmente las de geometrías complejas (Azagra & Bernabeu Larena, 2012).

1.4.1. Los módulos poliédricos como base para la generación de las estructuras planas.

Las estructuras espaciales generadas con módulos a base de formas poliédricas, son las primeras metodologías utilizadas para el diseño y construcción de estructuras reticulares. A través de los años, iniciando con Graham Bell, se han ido creando estructuras reticulares basadas en poliedros, como prismas, pirámides, poliedros Platónicos y de Arquímedes, domos geodésicos y superficies poliédricas complejas, ya que actualmente son muy utilizadas porque sus elementos planos son más fáciles de construir que las curvas utilizadas para generar las formas.

También para la construcción de las estructuras planas tomando como base el empleo de módulos de diferentes sólidos poliédricos, puede generar formas de varias caras o superficies, desarrollando una forma geométrica en volumen más compleja al unir las diferentes superficies en sus lados.

Es importante definir algunos términos para diferenciar la geometría generada. El poliedro es una forma 3D, que consiste en caras planas, bordes rectos y vértices, donde cada borde está compartido exactamente por dos caras y cada vértice por lo menos por tres bordes y donde se encuentran tres caras. Las superficies poliédricas es la unión de varios polígonos planos que no necesitan formar un volumen, las superficies poliédricas pueden tener vértices limítrofes y bordes limítrofes (H. Pottmann et al., 2007). Es importante mencionar que por medio de superficies poliédricas se podrán generar volúmenes complejos, y que por su forma final desarrollada por la unión de los polígonos, se logran diseñar volúmenes en forma de poliedros complejos sin posibilidad de clasificarlos en una tipología en base a sólidos Platónicos o de Arquímedes, y que en el diseño de estructuras para las edificaciones son empleadas para la generación final de una forma única e innovadora, o en su defecto poliedros ya conocidos como pirámides y prismas.

Las superficies planas estarán basadas principalmente para su generación, en el diseño de formas regulares, para poder así fabricar la envolvente en un plano utilizada en un espacio, o para la formación de estructuras en volumen que

generen una envolvente en forma de un poliedro irregular. La evolución de las formas geométricas basadas en superficies planas a través de los años es variada, desde cubiertas planas sin ninguna inclinación hasta generar las superficies de formas complejas con diferentes inclinaciones.

Ilustración 80 Biblioteca Central de Seattle, Estados Unidos, Rem Koolhaas (OMA).

En la generación de las retículas de las estructuras planas es importante poder entender la diferencia de las formas geométricas posibles a diseñarse y generarse, para poder emplear el sistema estructural adecuado tomando como base las retículas generadas de la forma, ya que todos los factores trabajan como un organismo simbiótico que requieren de una solución.

Las retículas empleadas para la formación de las estructuras de superficies planas, serán principalmente las retículas generadas para estructuras de una o varias capas ya sean en dos, tres o cuatro direcciones. Es importante recordar que el empleo de superficies poliédricas (principalmente con mallas triangulares) será la base en la generación de las formas libres por medio del suavizado de sus curvas.

1.4.2. Clases de superficies tradicionales, las superficies de rotación y traslación como base de las estructuras bóveda cañón, cúpulas y formas complejas.

Las clases de superficies tradicionales son basadas en la generación cinemática de las formas, estas son arrastradas por una curva perfil o línea recta a someterse a un movimiento suave (H. Pottmann et al., 2007). La generación de este tipo de superficies es la base en el diseño de formas geométricas tradicionales como la bóveda cañón y las cúpulas, por medio de un movimiento de rotación o traslación de las líneas curvas sobre un eje, pero también para la generación de los diseños estructurales actuales complejos, y que en conjunto con algunos casos empleando superficies poliédricas, se generan las superficies de forma libre diseñadas en los últimos años del siglo XX y los siguientes años del siglo XXI. Por lo tanto el diseño de las formas de las estructuras reticulares principales, se simplificaran a la generación de un sistema lineal para la formación de un sistema en plano o espacial, partiendo de vigas o celosías empleando técnicas de rotación o traslación.

Las superficies de rotación y traslación.

Las superficies de rotación y traslación son formas aplicadas a estructuras reticulares que comienzan su desarrollo durante el siglo XIX y principios del siglo XX, continuando su evolución a lo largo de los años hasta nuestros días. Las superficies de rotación son generadas al rotar una curva a sobre un eje y las superficies de traslación al trasladar una línea curva a lo largo de otra línea curva o línea recta.

Ilustración 81 Pabellón japonés Expo Hannover 2000, Alemania, Shigeru Ban. (S. B. Architects; Shukhov, 2013).

Las superficies de rotación como ya se ha mencionado son generadas rotando una curva sobre un eje. Donde cada punto de la curva generada describe a un círculo el cual está sobre un plano, que se encuentra ortogonalmente sobre el eje (*H. Pottmann et al., 2007; Schueller et al., 1983*). Un ejemplo de superficie de rotación es la forma geométrica de la cúpula, que es generada ordinariamente por un cuarto de círculo o un arco que rota sobre un eje. Aunque la variedad de formas geométricas que se pueden dibujar con la técnica de generación de superficies de rotación es muy variada, la forma depende de la curva que se utilice, tomando en cuenta que la gran variedad de curvas que se pueden utilizar son infinitas.

Ilustración 82 Superficie de rotación son generadas por la rotación de una curva sobre un eje (*H. Pottmann et al., 2007*).

Para generar superficies de traslación imaginemos dos curvas o una curva, y una línea b y d intersectándose en un simple punto, el origen. Trasladando el perfil de la curva d sobre la trayectoria de curva o línea l , generando así una superficie de traslación (H. Pottmann et al., 2007; Schueller et al., 1983). La bóveda cañón como tal se puede considerar una superficie de traslación, al generar un forma geométrica donde una curva normalmente de medio círculo se traslada sobre una línea recta.

Al igual que las superficies de rotación, la variedad de formas que se pueden diseñar al aplicar la técnica de generación de superficies de traslación son infinitas, debido a la gran variedad de curvas que se pueden emplear, y a la vez combinar para generar una nueva forma geométrica distinta a las ya generadas con anterioridad, se convierte al igual que las superficies de rotación en una herramienta de diseño de formas cuyo límite es la capacidad de cada diseñador.

Ilustración 83 Generación de una superficie de traslación (H. Pottmann et al., 2007).

Las bóvedas cañón son diseñadas por medio de superficies de traslación que estarán generadas como se ha mencionado por diferentes tipos de curvas para el diseño de las cubiertas, estas curvas son:

- Semicírculo.
- Parábola.
- Elipse.
- Hipérbola.
- Cicloide.
- Curvas de forma libre.

Ilustración 84 Diagrama de generación de formas tipo bóveda cañón (Diseño propio).

Las superficies regladas y superficies helicoidales.

Dentro de la tipología de superficies tradicionales y en algunos casos superficies complejas, están las superficies regladas y helicoidales para el diseño de formas geométricas reticulares de estructuras envolventes para las edificaciones.

Ilustración 85 A) Estadio Cuauhtémoc, México, Francisco Castaño. B) Greenside Place Link Bridge, Escocia, Buro Happold Engineers. (Geometrica; LUSAS, 2014).

Los cilindros, conos, hiperboloides de una capa y paraboloides hiperbólicos son superficies que llevan familias de líneas rectas. Por definición, estas superficies contienen una familia continua de líneas rectas llamadas

generadores o resoluciones. Las superficies regladas se pueden generar moviendo una línea recta a través de una curva directriz, por medio de conectar puntos correspondientes de dos líneas curvas; también las superficies tipo paraboloides hiperbólicos que son bien establecidos en el área de las cascaras se pueden denominar como superficies regladas; y los conoides que son superficies formadas por una línea recta que se desplaza sobre otra línea recta encima de una línea curva (H. Pottmann et al., 2007). Los paraboloides hiperbólicos son las superficies regladas más usadas para la construcción de las cascaras, realizados por primera vez por V. Shukhov a finales del siglo XIX y principios del siglo XX.

Ilustración 86 Generación de una superficie reglada (H. Pottmann et al., 2007).

Las superficies helicoidales son generadas cuando se aplican movimientos helicoidales suaves a una curva espacial, durante este movimiento cada punto de la curva generadora traza una hélice. La red de curvas congruentes generadas y las hélices determinan la forma de la superficie helicoidal. Las superficies helicoidales, son dibujadas con círculos y líneas rectas, empleados como generadores y son comúnmente usadas para propósitos de modelado (H. Pottmann et al., 2007). Con el empleo de formas helicoidales se pueden generar retículas para la formación de estructuras entramadas de soporte de

edificaciones, un ejemplo de utilización es la pasarela peatonal de la Carbon Tower de Peter Testa.

Ilustración 87 Generación de una superficie helicoidal.

1.4.3. Las superficies de forma libre como base geométrica en la generación de las estructuras innovadoras.

La mayor parte de la arquitectura desarrollada en la época moderna y contemporánea, además de la arquitectura pasada iniciada en el siglo XIX, muestra la voluntad de hacer referencia a la captación de la técnica constructiva de los conocimientos adquiridos en diferentes formas diseñadas: desde el caso en el que la estructura es esencialmente la forma; siguiendo en el caso donde el lenguaje estructural es evidente e integrado, más o menos orgánicamente, con otros componentes del diseño arquitectónico; hasta el caso en el que hay una integración sustancial de todos los componentes del proceso de diseño, como en las diferentes arquitecturas (Trovalusci & Tinelli, 2010). En el desarrollo de las estructuras de forma libre en conjunto con la técnica constructiva, se busca integrar la estructura a la forma o la forma en la estructura en todos sus componentes del proceso de diseño de la estructura, logrando que la estructura y la forma se optimicen para ser parte esencial del proyecto y garantice su construcción.

Las superficies de forma libre son ampliamente utilizadas en la época contemporánea para el diseño y fabricación de estructuras reticulares, utilizando principalmente mallas triangulares, ya que permiten suavizar las superficies y crear formas que aparentan ser curvas, integrando todos los componentes estructurales al proceso de diseño.

Las superficies de forma libre ofrecen mucha mayor flexibilidad que las superficies clásicas, como los cilindros, conos, esferas, superficies de rotación y superficies regladas.

Ilustración 88 El Auditorio del DZ Bank, Alemania, Frank Gehry (AXICA, 2014).

Historia de las superficies de forma libre en la arquitectura.

Geometrías complejas y superficies de forma libre aparecen muy temprano en la arquitectura, donde datan por lo menos el primer domo como refugio fabricado de madera y sauce cerca de 400,000 años atrás. Superficies de doble curvatura han existido en domos y ornamentos esculturales de los edificios a través de los años. Fue en el siglo XIX cuando los arquitectos se concedieron una significativa libertad de sus expresiones de la forma y estilo con la industrialización, mejorado los materiales de construcción como hierro, acero, y hormigón reforzado (H. Pottmann et al., 2007).

A finales del siglo XIX y principios del siglo XX, Antonio Gaudí alcanzó un gran entendimiento de la libertad de la forma de las superficies, a través del desarrollo de las técnicas para encontrar las formas y maquetas que le gustaban. En los años 1960's dos estudiosos de las estructuras ligeras reticulares, como lo fueron Günshell y Castaño, aplican sus técnicas de diseño y construcción reticular para la generación de formas complejas, convirtiéndose en pioneros de las formas libres.

Con el desarrollo de la tecnología, el arquitecto Frank O. Gehry se convierte en el primer diseñador a finales del siglo XX, en emplear los sistemas computacionales para la construcción de formas libres a través del empleo de un

escáner 3D y un software empleado en la industria aeronáutica, dando inicio así una era digital en el diseño y construcción de las edificaciones (Kolarevic, 2004; Pottmann et al., 2008).

Con el inicio de la era digital se ha “producido un impresionante desarrollo de los sistemas computarizados de representación, cálculo, fabricación y montaje, que han convertido al ordenador en un potentísimo asistente en la concepción, el análisis y la construcción de propuestas altamente complejas. Así mismo, tanto el desarrollo de potentes sistemas de cálculo (que permiten resolver con rapidez y precisión problemas de gran dificultad analítica), como la profundización actual del entendimiento estructural, han creado una situación de gran dominio del hecho estructural, permitiendo abordar con seguridad sistemas y estructuras de gran complejidad, no planteables o resolubles hasta hace relativamente poco tiempo. Por último, cabe destacar la notable mejora de las propiedades y de las características de los materiales estructurales existentes, fundamentalmente en términos de calidad, resistencia, durabilidad, control y condiciones de puesta en obra, que ha contribuido a ampliar sus posibilidades técnicas y constructivas” (Azagra & Bernabeu Larena, 2012).

“Pero los grandes retos en el diseño arquitectónico de las superficies de forma libre viene principalmente de la realización de vigas y nodos” (Helmut Pottmann et al., 2007).

El diseño de las superficies de forma libre.

El diseño de superficies de forma libre puede variar dependiendo de la técnica y tecnología empleada para generar el diseño de las superficies, entre ellas se pueden mencionar:

- Superficies Bézier, generadas de curvas Bézier
- Superficies B-Spline, generadas de curvas B-Splines.
- Superficies NURBS, generadas de curvas NURBS.
- Superficies de mallas, generadas para suavizar la superficie.

Ilustración 89 Superficie de forma libre aplicada al Yas Island Marina Hotel, Abu Dhabi, Asymptote Architecture
(Pottmann et al., 2008).

Estructuras de forma libre.

La realización de las superficies de forma libre en la arquitectura plantea grandes retos ingenieriles y de diseño. El diseño completo y proceso de construcción implica muchos aspectos, incluyendo el hallazgo de la forma y su solución, una segmentación factible en paneles y módulos, funcionalidad, materiales, estática y costo. Por si sola, la geometría no es capaz de plantear soluciones para el proceso entero, pero el entendimiento sólido de la geometría es un paso importante a través de una realización exitosa del proyecto. La generación de las formas libres en la arquitectura está basada en superficies discretas como el uso de mallas triangulares para suavizar la forma, al ser una técnica ya mencionada y perfectamente adaptable a estas formas. (H. Pottmann et al., 2007).

Es a finales del siglo XX, iniciada en los años 1960's, donde se da un gran avance en el desarrollo de las estructuras de superficies de forma libre reticulares, principalmente por el desarrollo y empleo de las tecnologías computacionales aplicadas a la creciente industria de la construcción, además de la evolución de los materiales, y sistemas estructurales aplicados a la construcción de las nuevas estructuras y formas, lo que planteó nuevos retos para arquitectos e ingenieros.

En su artículo Azagra & Bernabeu Larena nos proponen para el análisis de las estructuras de forma libre cuatro planteamientos proyectuales posibles desde el punto de vista de la libertad formal del proyecto, de su proceso de generación y desarrollo:

- Formas escultóricas.
- Formas de adaptación o conjunción estructural.
- Generación estructural o algorítmica.
- Formas paramétricas.

Formas Escultóricas.

“La situación más clara de formas libres es aquella en la que las formas derivan directamente del trazo libre del arquitecto, ajenas a cualquier criterio que no sea formal, sin tener en cuenta, al menos explícitamente, consideraciones de índole constructivo o estructural. En estos casos el arquitecto aprovecha las posibilidades que ofrecen los desarrollos técnicos y estructurales, planteando nuevas formas y geometrías que trascienden las resultantes de la aplicación directa de la lógica estructural, ofreciendo una nueva libertad formal. En este sentido podemos considerar, a modo de referente histórico, el edificio de la TWA de Eero Saarinen, que parte de los desarrollos técnicos y formales de Torroja en el campo de las láminas delgadas, de carácter estricto, para adoptar una libertad formal y una plasticidad nuevas. Actualmente, el ejemplo más claro de estas formas libres lo constituyen sin lugar a dudas los proyectos de Frank Gehry, y en particular el museo Guggenheim de Bilbao. Frank Gehry aprovecha las posibilidades técnicas actuales en cuanto a software de representación y control de geometrías complejas, mediante la adaptación del programa de diseño aeronáutico Catia al campo de la arquitectura y la construcción, con el objetivo de reproducir fielmente las geometrías libres que proponen” (Azagra & Bernabeu Larena, 2012).

Ilustración 90 Walt Disney Concert Hall, U.S.A., Frank Gehry (Eliinbar, 2011; Siegel, 2008).

La generación de formas escultóricas de superficies de forma libre es un planteamiento muy empleado por los arquitectos para solventar sus proyectos arquitectónicos, pero a la vez muy criticado por otros al no analizar la complejidad de la estructura para lograr su estabilidad, pero reforzado con el uso tecnológico que ofrecen las computadoras, haciendo que la generación escultórica de la forma, se facilita de manera considerable al reproducir de manera exacta el diseño planteado y a su vez lograr la estabilidad y resistencia de la estructura necesaria. Las posibilidades de propuestas de diseño empleando las formas escultóricas son infinitas, el arquitecto pondría los límites.

Formas de adaptación o conjunción estructural.

“Este planteamiento de generación de superficies de forma libre en la arquitectura nos lleva dentro del análisis de las superficies de forma libre, en el que existe un desarrollo conjunto de las mismas, que tiene en cuenta los criterios y requisitos estructurales y constructivos. Este desarrollo conjunto de las superficies de forma libre se ve además animado por la difícil aceptación de la arbitrariedad en la arquitectura. Esta reticencia a la arbitrariedad formal explica la poca entusiasta acogida que a menudo reciben los proyectos de Gehry, uno de los pocos arquitectos contemporáneos que acepta y defiende abiertamente la arbitrariedad en su arquitectura, consciente de que sus ordenadores harán posible, en primer lugar, la definición de sus formas caprichosas, garantizando después la construcción de sus proyectos” (Azagra & Bernabeu Larena, 2012; Bernabeu Larena & Azagra, 2010).

Ilustración 91 Campus de Justicia de Madrid (Nolaster, 2012).

En la arquitectura actual donde la generación de superficies de forma libre se convierte en una solución proyectual a diferentes proyectos, es el entendimiento estructural el que juega un papel importante para el desarrollo de la estructura soportante o envolvente, donde en muchos casos la arquitectura es renuente a aceptar la libertad formal de los proyectos, por lo que busca que los sistemas estructurales y tecnologías se conviertan en la solución de las estructuras, lo que podría al final afectar la forma planteada, que desde un inicio se adapte a las especificaciones técnicas que permitan su construcción, logrando una coherencia final entre el diseño de la forma y la solución técnica.

Formas de generación estructural o algorítmica.

“En este nivel de definición de conjunto de las superficies de forma libre, se pueden considerar también los proyectos que utilizan para el planteamiento o desarrollo de la forma sistemas basados en la optimización de la estructura. Un ejemplo, la cubierta del British Museum es el resultado de un sistema de desarrollo de la forma que parte de la geometría que adoptaría una película de jabón sometida a los mismos condicionantes geométricos que la cubierta (perímetro exterior rectangular e interior circular, altura total disponible muy ajustada), pero modificándola y controlándola mediante modelos computarizados, a fin de optimizar su comportamiento estructural. El resultado es una malla que se adapta de forma natural a las geometrías de los perímetros rectangular exterior y circular interior, a la vez que controla el nivel de tensiones en las distintas zonas, lo que permite el empleo de elementos estructurales metálicos de pequeño tamaño, garantizando la transparencia deseada” (Azagra & Bernabeu Larena, 2012).

Ilustración 92 El gran patio del British Museum, Inglaterra, Norman Foster (Foster & Partners, 2015).

La adaptación y optimización de la estructura a proyectos (inclusive a los ya existentes) se convierte en una solución proyectual para aquellos diseños donde en la generación del proyecto y la superficie estará limitada, pero no impide se de una libertad de la forma optimizada a las necesidades proyectuales y de las condicionantes de contorno.

Esta técnica de generación nos plantea que ninguna limitante hace que la generación de la forma libre sea imposible a ser empleada, su adaptación matemática para hacer estable la forma y el conocimiento de la geometría serán herramientas que ayuden en la solución de este tipo de proyectos.

Formas paramétricas.

“En este proceso de desarrollo de la arquitectura vinculado a los nuevos desarrollos tecnológicos y computacionales, el establecimiento de una cultura digital en la sociedad actual ha propiciado la consideración de procesos generadores de lo que podríamos denominar arquitectura digital, iniciada a finales del siglo XX, que tratan de integrar en el proceso de desarrollo del proyecto toda una serie de factores y complejidades, vinculadas no solo al proyecto en sí mismo o a las técnicas constructivas y arquitectónicas, sino en un sentido más global a todo tipo de motivaciones y parámetros económicos, sociológicos o culturales. Los proyectos de arquitectos como Greg Lynn, Ben van Berkel, Massimiliano Fuksas o muy especialmente Zaha Hadid defienden esta aproximación a la arquitectura, que Patrik Schumacher, de Zaha Hadid Architects, ha definido como parametricismo, justificándola como el nuevo gran estilo arquitectónico después del Modernismo. De acuerdo con el planteamiento paramétrico que propone Shumacher, el proceso parte de una serie de principios, que organiza en negativos o tabús (evitar formas rígidas –ausencia de maleabilidad-, evitar la repetición –ausencia de variedad-, evitar la mezcla de elementos aislados inconexos –ausencia de orden-), y positivos o dogmas (las formas deben ser blandas, los sistemas deben ser diferenciados –gradientes- e interdependientes –correlaciones-). A partir de estos principios se organiza el sistema de definición y desarrollo del proyecto, en el que los distintos parámetros son fácilmente modificables, pudiendo orientar el resultado en función de los intereses arquitectónicos o formales, hasta alcanzar la expresividad deseada” (Azagra & Bernabeu Larena, 2012).

Ilustración 93 MyZeil, Alemania, Massimiliano Fuksas (Knippers & Helbig, 2009).

El diseño paramétrico en la actualidad empieza a ganar la confianza en el diseño de las nuevas superficies arquitectónicas, pero sobre todo para la generación de formas más complejas e inclusive en las denominadas geometrías emergentes y generativas, que utilizan las nuevas tecnologías de proyectar con ordenadores, aplicadas en el diseño paramétrico que en conjunto con el desarrollo de los nuevos materiales y sistemas constructivos harán que las soluciones sean posibles.

El parametricismo como lo menciona Shumacher gana terreno y se presenta como una solución para apoyar a los arquitectos e ingenieros para generar las formas futuras que se plantean únicamente en la arquitectura de la ciencia ficción, aunque se genere una desvinculación de la forma y la estructura, ya que se mantienen como formas diseñadas en laboratorio imposibles de construir.

1.4.4. La transformación tipológica de la forma geométrica de las estructuras reticulares triangulares.

La transformación de las tipologías de las formas geométricas empleadas en edificaciones reticulares en la segunda mitad del siglo XX, se ve relacionada con los avances tecnológicos, las necesidades proyectuales y el desarrollo de las nuevas soluciones estructurales, donde la generación de la geometría depende de su comportamiento estructural ante los esfuerzos a los que son sometidos, a la tecnología estructural empleada y al tipo de proyecto para el que va a ser diseñada la estructura.

La generación de superficies por medio de diferentes metodologías; como las ya mencionadas técnicas de traslación y rotación de diferentes formas lineales, dará como resultado la concepción de formas con gran historia como las cúpulas o variantes de las mismas, que serán diseñadas con las nuevas técnicas y tecnologías, hasta generar formas más complejas como los son los paraboloides hiperbólicos desarrollado en la segunda mitad del siglo XX, y finalmente las formas libres diseñadas por medio de las nuevas tecnologías de generación de superficies complejas innovadoras, como el parametricismo ante la exigencia de propuestas que sean diferentes a las tipologías propuestas a principios en la segunda mitad del siglo XX; dará como resultado una variedad infinita de propuestas geométricas a ser aplicadas en la arquitectura.

El conocimiento de las técnicas de generación de las formas y superficies para el diseño de las posibles estructuras reticulares, así como la combinación de las diferentes metodologías mencionadas, permitirán dar una gran variedad de soluciones más elegantes y estéticas, cuyo procedimiento para completar la propuesta puede ser la triangulación de las superficies propuestas, además de que ayudarán a entender el como se realizó la evolución y desarrollo de las geometrías que se generaron durante el periodo de estudio.

En el siguiente diagrama se desarrolla una explicación de la generación de formas aplicando un sistema reticular triangular, diagrama que busca resumir las formas lineales básicas y técnicas de diseño, para la generación de los volúmenes básicos y complejos, además de superficies poliédricas generados por el suavizado de sus curvas.

Las superficies complejas desarrolladas para la generación de geometrías innovadoras, cuya solución empleada es la reticular, se pueden desarrollar por metodologías de dibujo y diseño que representan mayor complejidad que puedan dar solución a estas nuevas exigencias, estas metodologías son:

- Operaciones booleanas y generación de superficies por adición.
- Deformaciones geométricas.
- Evolución de curvas.

- Superficies desarrollables y desdoblamientos.

1.5.El sistema estructural como un factor que influye en la solución final de la forma de la estructura reticular.

El sistema estructural como solución de la forma, juega un papel importante en el diseño del proyecto arquitectónico desde los últimos años del siglo XIX hasta la época contemporánea, principalmente en los años de la posguerra de la segunda mitad del siglo XX, cuando empieza la época dorada de las estructuras reticulares. Con el desarrollo de nuevos sistemas constructivos, principalmente prefabricados para el diseño de estructuras reticulares, ante los nuevos materiales que surgen para utilizarlos en la construcción por la carencia de mano de obra calificada y la escasez de materiales que presentaba el mundo golpeado por la Segunda Guerra Mundial, se proponen nuevos sistemas estructurales capaces de adaptarse a los diferentes factores, características y necesidades para los que deben ser proyectadas las estructuras ante la problemática de la época.

Para el desarrollo de los nuevos sistemas estructurales, será necesario tomar en cuenta diversos factores, como el trabajo estructural al que será sometido la estructura para absorber de manera eficiente las cargas y empujes que se desarrollan, así como los materiales que se emplean para su construcción, los avances tecnológicos que se utilizan en sistemas constructivos de la estructura, y los elementos principales a ser utilizados, aplicando la industrialización como técnica para una prefabricación de cada una de las partes que conforman al final a los sistemas estructurales.

La descripción y análisis de cada uno de los factores, así como su desarrollo que se da durante la segunda mitad del siglo XX, será de importancia para el entendimiento de la evolución de las estructuras reticulares triangulares hasta la época actual, y en su generación de los sistemas estructurales que serán aplicados. Es importante mencionar, que todas las características y factores que determinan un proyecto estructural reticular serán importantes para poder desarrollar y determinar la estructura empleada para un proyecto determinado, ya que cada una de ellas van a influir en el comportamiento final del proyecto,

por lo que es necesario determinarlas y analizarlas para poder emplear la mejor solución.

El diseño de la estructura reticular en base al tipo de sistema estructural empleado, se tomará en cuenta la clasificación en el flujo de fuerzas y transmisión de cargas (Engel, 2000), por lo que se determinan cuales son los sistemas estructurales que emplean un sistema reticular triangular:

- Sistema de estructuras de forma activa.
- Sistema de estructuras de vector activo.
- Sistema de estructuras de sección activa.
- Sistema de estructuras de superficie activa.
- Sistema de estructuras de altura activa.

1.5.1. La evolución tecnológica como factor en la influencia del desarrollo de los sistemas estructurales reticulares.

La influencia de la industrialización en la construcción empezó a ser evidente en la primera mitad del siglo XIX con la construcción del Palacio de Cristal. Algunos de los edificios erigidos de esta época fueron basados esencialmente en la aplicación de los nuevos materiales inventados, recursos técnicos desarrollados y métodos de producción implementados. Dando la pauta a mejorar la calidad de los materiales ya existentes y sistemas de construcción empleados que permitieran la evolución de las estructuras de masa a estructuras de sistemas reticulares ligeros.

Durante la segunda mitad del siglo XX, periodo ubicado en el mundo de la posguerra, inicia un cambio en la forma de construir y de diseñar, que se caracterizó principalmente por la carencia de materiales de construcción y mano de obra calificada, y posteriormente por el acaparamiento de materiales como el acero para la fabricación de armamento necesario ante el inicio de la Guerra Fría y la Guerra de Corea, lo que planteaba la necesidad de utilizar otros materiales, y por medio de la tecnología, desarrollar nuevas técnicas y procesos de construcción que facilitarían la realización de los proyectos estructurales ante las nuevas necesidades de la época, construcción de fábricas principalmente armamentistas, así como la necesidad de construcción de hangares ante el

desarrollo de aviones de mayor escala. Como consecuencia en este proceso de desarrollo tecnológico se busca disminuir los consumos de materiales, reducir los costos, tiempos de construcción y optimizar las metodologías de construcción de los diferentes proyectos, para dar pauta a nuevos ideales y conceptos como la sostenibilidad.

Evolución y desarrollo que llegará hasta la era digital del diseño arquitectónico a finales de siglo XX, donde se desarrollarán técnicas de diseño como el parametrismo. La era digital fue iniciada por Frank Gehry con el proyecto The Fish ubicado en Barcelona, España y consolidando su trabajo digital en el Walt Disney Concert Hall ubicado en Los Angeles, California, Estados Unidos. A continuación se explican algunos de los factores que influyen en el proceso de transformación de las estructuras reticulares.

Prefabricación e industrialización.

La historia de la prefabricación en la industria de la construcción comienza al igual que la mayoría de las industrias a principios del siglo XIX con la revolución industrial. Este hecho histórico que sella el inicio de la industrialización en la historia, marca un punto de cambio al empezar a fabricar por medio de la máquina, acelerando el proceso de producción sin disminuir la calidad necesaria y muchas veces exigida, consiguiendo así una producción en serie de diferentes productos.

Estos avances en la industrialización que sucedieron el siglo XIX fueron emparejados por la introducción de las plantas centrales de poder para el funcionamiento de máquinas por cintas. El taller se convirtió en la fábrica, y su transformación implicó enteramente los nuevos principios de producción (Wachsmann, 1961).

Los procesos de prefabricación en la construcción en el siglo XIX se consolidan con la construcción del Palacio de Cristal para la Exposición Universal de Londres de 1851. Es importante mencionar que el edificio completo fue planeado para ser construido con una retícula modulada, basada en las distancias iguales entre los centros de los soportes, donde el marco consiste en

medidas estandarizadas de columnas huecas de hierro fundido donde el diámetro exterior de estas columnas fueron siempre el mismo, pero el espesor de las mismas variaron con las cargas acarreadas. Esto hizo que fuera posible producir en masa las vigas, armaduras y las columnas, en unificadas dimensiones estandarizadas. Las armaduras fueron de tres tipos: hierro fundido, hierro forjado remachado y madera. Las conexiones a las columnas delgadas de hierro fundido dan la suficiente rigidez transversal. Paxton y su equipo inventaron un sistema de producción especial, ensayando y creando herramientas de montaje para manejar fabricación y montaje, dando como resultado que el montaje se logrará en 4 meses aproximadamente (Wachsmann, 1961) .

Posteriormente con la invención de las estructuras espaciales por Alexander Graham Bell a principios del siglo XX, se desarrolló un proceso de modulación de sus estructuras por medio del prefabricado de sus elementos, además de la fabricación de un nodo de unión de hierro fundido que facilitaría el montaje de las estructuras, convirtiéndose en el primer nodo prefabricado utilizado para la construcción de estructuras reticulares espaciales. Graham Bell daría un paso gigante en el prefabricado de las estructuras por medio de su modulación, y que serviría como base para la fabricación posterior de los sistemas de unión y modular prefabricados por primera vez industrializados y comercializados por Max Mengerinhausen con el sistema MERO.

El movimiento de la prefabricación no fue real hasta principios de los años 1930's, cuando los Estados Unidos trataron de construir por si solos, fuera de la gran depresión, este desafío de la prefabricación trajo grandes negocios en el campo. A principios de los años 1940's, la prefabricación fue aplicada a la guerra y dio buenas cuentas por sí misma, al llenar la necesidad de la casa, la cual pudo levantar rápidamente estructuras con el mínimo de mano de obra y posteriormente podría ser desmontada y movida (Prentice, 1951a).

A la mitad de la Segunda Guerra Mundial, en Alemania, se inicia una nueva etapa en la prefabricación de los sistemas estructurales reticulares con la comercialización del nodo de unión del sistema MERO y sus posteriores adecuaciones que sentarán las bases para posteriores adecuaciones de

sistemas modulares y de unión reticulares de sistemas prefabricados, sistemas que modificarían la forma de construir y diseñar las estructuras ligeras, dando como resultado una producción en masa de los sistemas de unión que inicia a mediados de siglo XX, por medio de una mecanización e industrialización de los procesos.

En los años 1950's, surge un alto nivel de mecanización en Estados Unidos, provocada por el relativo alto costo de mano de obra sobre los materiales, provocando que en la industria de la construcción, esta mecanización sea utilizada para la estandarización de los elementos de construcción, para la prefabricación de componentes estructurales y los no estructurales, así como para el uso extensivo de equipo mecánico y herramientas manuales combinados con el motor en el sitio de la construcción, y lograr la planeación completa de la construcción por el contratista para mejorar la metodología de montaje en el proceso de construcción (Newby, 1954).

Posteriormente, el inicio de la digitalización de los proyectos y la introducción de los cálculos estructurales por medio de ordenadores en los años 1960's y 1970's se optimizó los procesos, técnica que se consolida con el inicio de la era digital a inicios de los años 1990's con la introducción de la fabricación digital por Frank Gehry, cambiando la concepción de la construcción de las edificaciones, cambios que se requerían ante los nuevos retos que la nueva era digital en la arquitectura planteaba con la generación de formas imposibles de construir.

La prefabricación e industrialización planteó un factor importante en el desarrollo de las estructuras reticulares a tomar en cuenta en su análisis y evolución de las estructuras, dependiendo de la época en la que se fabricaron y construyeron.

Métodos de construcción y materiales prefabricados.

Con el desarrollo de la industrialización a principios del siglo XX, empezó una evolución de manera constante en los métodos de construcción y diseño de estructuras por medio del desarrollo de materiales, sistemas constructivos, sistemas de cálculo y diseño, e inclusive posteriormente de montaje de

estructuras, aunque durante la segunda mitad del siglo XX, diversas tecnologías se desarrollaron y ayudaron a que se logrará una evolución rápida de las retículas triangulares en los próximos años, ante las necesidades que se presentaban y empezaban a surgir, algunos desarrollos tecnológicos influenciaron de mayor manera, por lo que se enumeran y analizan como apoyaron el desarrollo de las estructuras reticulares.

En el siglo XIX, el hierro fundido y el hierro forjado ya estaban siendo usados para propósitos de construcción pero su progreso con la industrialización marco un proceso de evolución en su utilización. El primer desarrollo exitoso fueron los perfiles de hierro laminados y posteriormente de acero, marcando un punto de cambio en el desarrollo de la construcción prefabricada de las estructuras. En las construcciones metálicas, el empleo primero del tornillo y después el remache jugaron un papel importante en el desarrollo del sistema de unión de los elementos prefabricados. Posteriormente con la re-inención del hormigón armado trajo consigo el desarrollo de la construcción monolítica y con en la fabricación de cables tensados, haciendo posible claros continuos de largos sin precedentes.

A mediados del siglo XX, el desarrollo de metodologías de elementos de conexión estructurales para la transmisión de las cargas, iniciadas con el Palacio de Cristal de Londres en 1851, fueron un factor importante en la evolución de los sistemas prefabricados de construcción de estructuras reticulares iniciados por Bell en el siglo XX, independiente de la materia prima de la cual está hecha, cuyo desarrolló se estuvo moviendo de manera más rápida en conjunto con las técnicas de producción nacidas de la industrialización. En muchas instancias, las uniones convencionales fueron remplazadas por conectores especiales, fabricados mediante procesos industrializados más complicados. En conjunto con las uniones, se desarrollaron los perfiles laminados y tubulares, que sirvieron para lograr un mejor desempeño de la estructura disminuyendo la cantidad de material empleado en su fabricación, logrando dispersar de manera más efectiva las cargas que se generan en la estructura con un mínimo de peso, a la par de los materiales y procesos con los que son fabricados.

Durante los años posteriores a la gran guerra, hubo pocos desarrollos en construcción en acero. La única notable característica es la aparición de tornillos de alta resistencia para la construcción estructural y la mejora de aplicación de soldadura. Los tornillos de alta resistencia son tensionados, por eso el estrés se transfiere de un miembro a otro a través de la fricción entre las partes conectadas (Newby, 1954).

La invención de los tornillos de alta resistencia, suplieron el uso de remaches y tornillos de resistencia estándar, su desarrollo se debería a diversos factores que acelerarían su empleo en el mundo de la posguerra. Estos factores que influyeron su desarrollo, fue en primer lugar la creciente escasez de remachadoras, desde el primer edificio de hierro que fue montado en 1848; posteriormente durante la segunda guerra mundial, contratistas tenían que escoger entre gastar para entrenar nuevos remachadores o gastar en entrenar los hombres que aplicarían las nuevas tecnologías de construcción, además de que las remachadoras y su mano de obra comenzaron a ser más difícil de conseguir como ya se ha mencionado, lo que en comparación al emplear los tornillos de alta resistencia no se requería de mano de obra calificada; por otra parte el tiempo necesario para instalar los remaches es mayor que la instalación de un tornillo, ya que pueden ser instalados por la mitad de la mano de obra necesaria en el remachado, además de disminuir el ruido durante el proceso de instalación, las inspecciones de las uniones sería menor ya que la norma de la época requería un 100% de inspección de los remaches colocados, por lo que la mayor resistencia de los tornillos, hace menos costosa la instalación ya que el atornillado era 3 veces más barato. Estos factores aceleraron el empleo y desarrollo de los tornillos de alta resistencia, después de la guerra 14 edificios de acero arriba de 21 plantas y un gran número de puentes de tren fueron contruidos con esta metodología (Knox Shear, 1955; Prentice, 1952c).

Con la introducción de la soldadura aplicada por medio de arco eléctrico causado por el desarrollo que sufre esta metodología de unión, y el mayor uso de acero para la construcción de estructura pequeñas y posteriormente de mayores dimensiones, se empieza a desarrollar una tendencia hacia la fabricación de miembros más ligeros, y disponer de menor cantidad de material

capaz de resistir las fuerzas implicadas en las estructuras de una manera más eficiente. Provocando que la soldadura haya tenido una influencia considerable en el desarrollo de secciones de chapa de acero fino fabricadas en frío, para tipos más pequeños de estructuras, y es aproximadamente en el año de 1930, donde el acero de calibre ligero parece haber sido introducido como una alternativa económica a la madera, para soportar cargas y cubrir luces moderadas, principalmente en la construcción de viviendas. Por medio de soldadura, el acero se convierte en un material más fácilmente moldeable y los miembros pueden ser formados más fácilmente para ajustarse a la distribución de tensiones. Desarrollando miembros ligeros fabricados en celosía o en marcos rígidos con el uso de acero de distintos calibres y secciones, siendo todos más fáciles de emplear y la fabricación de acero más adaptables a los requisitos arquitectónicos (Michaels, 1950). Logrando ahorros de material y costos, lo que permitiría un mejor desempeño de las estructuras y eficiencia en el trabajo de la estructura.

Ilustración 95 Vigas pretensadas de una luz de 155 m para un Hangar en Bélgica (Antuña Bernardo, 2003).

Otra metodología de construcción, fue el pretensado del acero que se desarrolla en los años 1950's, siendo el pionero el profesor Gustave Mangel de Bélgica. Este consiste en acero de alta resistencia trabajando a tracción, tensionado una viga ordinaria de acero al carbón o vigas entramadas para desarrollar estructuras más resistentes y más eficientes. Desde que el acero requiere menos arriostramientos a tracción que a compresión, son necesarios unas pocas barras altamente tensionadas o cables y que pueden ser fabricadas para absorber mucho del peso, incrementando la capacidad de carga, además de mejorar la rigidez. El interés en el pretensado en esta época se da por la disponibilidad de los tornillos de acero de alta resistencia, tendones de alambre y posteriormente placas que logran dar la solución del acero pretensado en diseños convencionales (Higgins, 1962; Prentice, 1954b).

Ilustración 96 Sistema de montaje Pentadome
para el Palacio Sant Jordi, Barcelona, 1992
(Chilton, 2000).

Las ventajas de pretensar las estructuras de acero a mediados del siglo XX son (Prentice, 1954b):

- Hay una posibilidad de disminuir ambas, peso y costo por una aplicación más eficiente de los materiales.
- Producir una mayor rigidez, una estructura más continua reduciendo la holgura entre componentes.

Sistemas de montaje.

Finalmente, diversos sistemas de montaje o erección se emplearon en el proceso de construcción de las estructuras reticulares ligeras (siendo un precedente el sistema de encofrados inventados por E. Freyssinet para los hangares de Orly, al optimizar el proceso de construcción en hormigón), para poder hacer más eficiente y rápido el proceso de armado, además del montado en sitio una vez que se ha industrializado y prefabricado los elementos modulares en fábrica. Dependiendo del sistema estructural empleado en la construcción de la edificación, se analiza el proceso de montaje en sitio y sus avances en el proceso de construcción, un método de erección es elegido para una estructura en particular, teniendo en cuenta varios factores de la siguiente manera: características de la estructura, calendario de la construcción, la seguridad, el costo y la fiabilidad del método, entre otros (Chilton, 2000; Youichi, Terumasa, Yoshihiko, & Takashi, 2009).

Fuller utilizó métodos de erección para la construcción de sus geodésicas en 1957, en

Honolulu, donde uso un sistema de suspensión, Fuller completó el domo parcialmente con cables de una torre central.

Pero es el sistema de erección *Pentadome*, desarrollado por el ingeniero japonés, Mamoru Kawaguchi, el que sobresale a otros sistemas, al pensar en la estructura como un sistema estructural desplegable, como lo propuso el arquitecto español Emilio Pérez Piñero. Mamoru Kawaguchi menciona: “los edificios complejos pueden ser fabricados en secciones para ser construidos usando retículas espaciales, estos pueden ser divididos en secciones que pueden usar bisagras una con otras en los soportes del perímetro. Con una selección apropiada de la localización de las bisagras, es posible plegar las secciones transversales, por lo tanto se genera una forma plegada, en este sistema la mayoría del contorno del techo está cerca del suelo. Subsecuentemente la retícula espacial puede ser desplegada en el perfil deseado y bloquearla en su posición, por lo que ya no es más un mecanismo. En orden de estabilizar el domo después de levantarlo, deben ser introducidas barras adicionales a lo largo de la línea de la articulación” (Chilton, 2000).

Ilustración 97 Sistema de erección Pentadome (Chilton, 2000).

Es importante resaltar la importancia de la empresa TOMOE Corporation en el desarrollo de métodos de montaje de estructuras reticulares. Métodos que han

desarrollado y evolucionado en base a la experiencia que ha generado las miles de estructuras que han fabricado desde 1932 (Youichi et al., 2009). Aunque también una gran cantidad de técnicas de montaje han sido inventadas y patentadas alrededor del mundo.

1.5.2. El sistema estructural como solución de la forma y el proyecto seleccionado.

El sistema estructural y su comportamiento son parte importante para el entendimiento de las estructuras reticulares, y así poder mantener la forma diseñada de las edificaciones proyectadas sin sufrir cambios que originen cambios de proyectos, ya que al conservar la forma se mantendrán los tiempos y presupuestos planteados para los que fue concebida la edificación, tomando como base que sin la estructura soportante no es posible la edificación.

Para el diseño de las estructuras es necesario contemplar los principios generales que una estructura debe contemplar para su diseño. Estos principios a tomar en cuenta serán principalmente la forma, la estética y la economía. Principios que serán de vital importancia para poder escoger y desarrollar el sistema estructural correcto del proyecto diseñado.

A la par se tendrá que contemplar los criterios de diseño que ayudarán a definir la estructura necesaria, siendo el sistema estructural el que planteará la solución para la construcción de la forma escogida ante la problemática que esta pueda presentar. Se tomará en cuenta las fuerzas como un sistema dinámico de cargas y el control de fuerzas, la geometría como un sistema descriptivo para determinar la forma de la estructura y el recorrido de las fuerzas, y el material como sistema material de las fuerzas y su traducción geométrica.

Tomando en cuenta los principios generales y criterios, se tomará como base el análisis y clasificación de la sistematización de estructuras propuesta por Heino Engel en su libro *Sistemas de estructuras*, en conjunto con la propuesta en edificaciones de altura de Mir M. Ali y Kyoung Sun Moon en su artículo *Structural Developments in Tall Buildings: Current Trends and Future Prospects* y Wolfgang Schueller en su libro *Horizontal-Span buildign structures*, que en combinación servirán para determinar la clasificación de los sistemas

estructurales reticulares empleados en edificaciones, clasificación que ayudará al entendimiento y el porqué de su empleo como solución de la forma, sistema constructivo y sistema estructural.

Según Engel para la transmisión de las cargas actuantes a través de los elementos estructurales materiales, existen 4 mecanismos típicos y un mecanismo atípico de orden superior (Engel, 2000):

- 1) La adaptación de las fuerzas denominada acción de la forma.
- 2) Subdivisión de las fuerzas denominada acción vectorial.
- 3) Confinamiento de las fuerzas denominada acción de la sección transversal.
- 4) Dispersión de las fuerzas denominada acción de las superficies.
- 5) Recoger y transmitir las cargas al suelo denominada acción en altura.

Pero para el entendimiento de las estructuras reticulares triangulares, se tomarán en cuenta para el análisis los mecanismos de acción de la forma, vectorial, de la sección transversal y acción en altura, descartando casi en su totalidad la acción de superficies ya que serán sistemas laminares, que en su mayoría carecen de algún tipo de malla que se adapte al estudio de estructuras de retícula triangular, tomando como excepción cuando se combine con otro sistema estructural reticular.

Criterio		Prototipo	Fuerzas	Característica
1	Forma	Arco funicular, cable suspendido, anillo circular y globo	Compresión o tracción	Línea de apoyo, catenaria, círculo.
2	Vector	Cercha triangular, celosía, superficie reticular.	Compresión y tracción	Retícula (triangular).
3	Sección transversal	Viga, pórtico, losa.	Flexión, fuerzas, cortantes	Perfil seccional.
4	Superficie	Lámina, lámina plegada nervada y membrana cilíndrica.	Fuerzas de membrana	Forma bidimensional.

5	Hibrido	Diversidad de formas	Diversidad de fuerzas	Diversidad de características.
6	Altura	Lámina, torre, retícula.	Condiciones complejas	Transmisión de las cargas al suelo.

Tabla 1 Criterio para el análisis de los sistemas estructurales.

Para los sistemas estructurales de retículas triangulares, se plantea una clasificación basándose los criterios que Engel enumera, en la propuesta se muestran los prototipos que conforman la retícula y las fuerzas que actúan sobre ellas, criterios que se muestran en la tabla anterior. Los sistemas estructurales se pueden definir y catalogar de la siguiente manera:

- a) Sistemas de estructuras de forma activa, son sistemas de material flexible, no rígido, en los que la transmisión de cargas se realiza a través del diseño de una forma adecuada y una estabilización característica de la forma (Engel, 2000).
- b) Sistemas de estructuras de vector activo, son sistemas de elementos lineales cortos, sólidos y rectos (barras), en los que la transmisión de fuerzas se realiza mediante descomposición vectorial, es decir, a través de una subdivisión en fuerzas unidireccionales (compresiones o tracciones) (Engel, 2000).
- c) Sistemas de estructuras de sección activa, son sistemas de elementos lineales rígidos y macizos en los que la transmisión de cargas se efectúa a través de la movilización de las fuerzas seccionales (Engel, 2000).
- d) Sistemas de estructura de superficie activa, son sistemas de superficies flexibles, pero resistentes a tracciones, compresiones y esfuerzos cortantes, en los que la transmisión de fuerzas se realiza a través de la resistencia de las superficies y una determinada forma de las superficies (Engel, 2000)
- e) Sistemas de estructuras híbridas son sistemas en los que la desviación de las fuerzas se efectúa a través de la acción conjunta de dos o más sistemas diferentes (Engel, 2000).

- f) Sistemas de estructuras de altura activa son sistemas en los que la transmisión de fuerzas debidas a su extensión en altura, es decir, el conjunto de las cargas de las plantas y el viento junto con la reacción del suelo, se realiza mediante las adecuadas estructuras en altura (Engel, 2000).

Tomando en cuenta el análisis propuesto por Engel y complementado la propuesta con otros autores e información obtenida en la investigación, se puede plantear y determinar la clasificación de los sistemas estructurales que aplican la retícula triangular tomando en cuenta las directrices de familia, tipo de estructura, elemento estructural y materiales, teniendo como resultado la siguiente clasificación (Ali & Moon, 2007; Engel, 2000; Schueller et al., 1983).

Capítulo 2

2. LAS TRANSFORMACIONES DE LA RETICULA TRIANGULAR APLICADA A LA ESTRUCTURA.

2.1.Contexto histórico, desarrollo de las estructuras de 1800 a 1945. La transformación de las estructuras reticulares lineares y bidimensionales a estructuras tridimensionales.

Las estructuras de retícula triangular no es una técnica proyectual de un sistema estructural que se haya desarrollado en los últimos años. Su desarrollo empezó hace más de doscientos años, donde la evolución de la estructuras y las edificaciones estaba ligada principalmente al desarrollo de los materiales de construcción y a las metodologías de construcción.

Para entender el desarrollo de las estructuras reticulares es importante comprender sus antecedentes, en su libro *The Turning point of a building*, el arquitecto de origen alemán Konrad Wachsmann (1904-1980) menciona: “Eventos del pasado servirán para ilustrar como fuerzas progresistas se desarrollaron, a pesar de una fuerte resistencia, contribuyendo a confirmar el juicio crítico y penetración en la realidad del presente. Describiendo los potenciales tecnológicos de la era, donde se mostrará cuanto de ello ha influenciado en ambas: el nivel de civilización y el nivel de cultura. En un intento de analizar requerimientos inminentes, conduce a propuestas de preparaciones para conocer las demandas y expectativas del futuro” (Wachsmann, 1961).

En su libro Konrad Wachsmann también menciona que es evidente el impulso hacia un nuevo concepto de construcción reconocible durante el siglo XIX donde sus origen es evidente, marcado principalmente por el desarrollo de la industria.

A mitad del siglo XVIII en la construcción de edificaciones, los materiales principales disponibles para arquitectos e ingenieros eran la piedra, la madera y el tabique, los metales eran usados principalmente para unir los materiales anteriores, por lo que la búsqueda y adaptación de nuevos materiales y aplicaciones fue necesario con el desarrollo de la Revolución Industrial.

La Revolución Industrial inicia a finales del siglo XVIII principios del siglo XIX, primero en Gran Bretaña, y posteriormente en el resto del mundo, marcando un punto de cambio en la historia universal, principalmente en las metodologías de producción de las diferentes industrias, modificando los procesos productivos

Ilustración 98 Interior The Halle au Blé.

Coupe transversale du Dôme (dét.)

Ilustración 99 Elevación de la unión del pie del arco, unión del ensamblaje de interrupciones del arco y corte transversal, Halle au Blé (De Bures, 1988).

por medio de la industrialización, disminuyendo los tiempos de fabricación y utilización de mano de obra. La Revolución Industrial se consolida con la invención de la máquina de vapor, finalmente con el desarrollo de los barcos y el ferrocarril. Posteriormente vino un periodo de progreso en la industria de la construcción, principalmente en el proceso de desarrollo de nuevas formas y técnicas estructurales, inicialmente con una multiplicidad de diferentes armaduras y eventualmente las retículas.

Con la Revolución Industrial vino una gran producción de hierro y después de acero, materiales de gran resistencia que permitieron la construcción de estructuras más ligeras de grandes luces y mayor altura. Casi al mismo tiempo, técnicas matemáticas habían sido desarrolladas para describir y predecir el comportamiento estructural, y el entendimiento de la resistencia de materiales, además de técnicas que avanzaron rápidamente (Chilton, 2000).

Ilustración 100 The Halle au Blé, París, 1806 (Bury, 1853).

La industrialización trae consigo un gran nivel de precisión técnica y calidad nunca antes alcanzada en la historia de la construcción, requiriendo mano de obra especializada que contribuyera en el proceso, al disminuir la cantidad de mano de obra artesanal. Pero quizás un factor decisivo dentro del desarrollo que se estaba dando en la industria de esta época, fue como se mencionó anteriormente la introducción del hierro, que abrió una nueva era para la realización de proyectos en la ingeniería estructural y la arquitectura.

Los primeros antecedentes de las estructuras reticulares ligeras comienzan cuando Belangen y Brunet diseñaron y construyeron *The Halle au Blé* en París en 1806 y 1811 en la forma de un domo semiesférico de hierro. En ese mismo año la parte central del *Corn Market* en París, fue cubierto por un domo de hierro de 39 m de diámetro. Los primeros domos en Inglaterra fueron construidos entre 1815-1823 sobre la ampliación realizada al *The Royal Pavilion en Brighton* (ampliación diseñada por el arquitecto John Nash), y en el *Greenhouse de Syon* (diseñado por Fowler en 1827) (Eekhout, 1989). Otro ejemplo es la bóveda cañón de hierro de 19 m de luz sobre los *Baños Públicos Diana* en Viena en 1820, esta estructura consistía en una serie de arcos de hierro de forma semicircular (Z. S. Makowski, 1962, 1986).

Ilustración 101, Arriba, The Royal Pavilion en Brighton. Abajo, The Greenhouse de Syon, 1827 (Krüger, 2011; Partington, 2014).

En Europa, especialmente en Alemania y Francia los domos reticulares fueron muy populares a principios del siglo XIX, lo que abrió una nueva era en la ingeniería estructural y la arquitectura (Z. S. Makowski, 1962). Algunos de los primeros domos de hierro forjado del siglo XIX consistieron de un número de medias vigas en celosía, usualmente teniendo una cuerda inferior recta y una superior en curva. Estas fueron simplemente apoyadas en un muro circular y conectadas a una viga anillo en celosía en el centro (Zygmunt Stanislaw Makowski, 1984).

Estos primeros proyectos que logran aligerar, industrializar y optimizar los procesos de construcción y fabricación se convierten en las bases para el desarrollo de sistemas constructivos que mejoren la calidad de lo que empieza a convertirse en la industria de la construcción. La cúpula de la Halle au Blé de Paris, utilizó costillas metálicas curvas en conjunto con anillos también metálicos con el objetivo de rigidizar la estructura, además de un anillo en la parte superior que trabajaría a compresión. Estas primeras formas de empezar a entender las estructuras de manera ligera serán un paso importante para su posterior aplicación a nuevas formas y proyectos estructurales.

Las celosías como solución de los elementos lineales.

Aunque las vigas en celosía han existido de acuerdo con Vitruvio desde el primer siglo A.C., donde los Romanos usaban vigas inclinadas para algunos de sus techos, amarrándolas juntas en sus bases para eliminar las cargas laterales. Consecutivamente un nuevo proceso de diseño y fabricación de estas vigas comenzaría en el siglo XIX. La evolución real de estas vigas en celosía comenzó en la primera mitad del siglo XIX con el desarrollo del ferrocarril en Estados Unidos y Rusia (Schueller et al., 1983), por lo que fue necesario el desarrollo de vigas en celosía (viga Long, Howe, Pratt, Warren y Vierendeel) de fácil fabricación, principalmente usadas para la fabricación de puentes, logrando así una nueva disposición de los elementos estructurales que las componían, evolucionando al minimizar el consumo de materiales y sus medidas.

El antecedente de la malla o retícula de la viga en celosía, se ha basado en la triangulación para un arriostramiento que permita mayor rigidez, por ser el

triángulo la célula más resistente a la deformación que puede obtenerse en el plano (Margarit & Buxadé, 1972), este antecedente sería aplicado de manera correcta en el proceso de diseño y desarrollo de las vigas en celosía.

Dentro del desarrollo de vigas en celosía, aunque hay una gran variedad de diseños se mencionan las más empleadas, donde en muchos casos se realizan adaptaciones que sirvieron para generar nuevas celosías aplicadas en vigas. En primer lugar se menciona a la viga en celosía tipo Long, debe su nombre al ingeniero estadounidense Stephen H. Long (1784-1864), y tiene su origen hacia 1835. Los cordones superior e inferior horizontales se unen mediante montantes verticales todos ellos arriostrados por diagonales dobles (Cridlebaugh, 2008).

Ilustración 102 Viga Long.

La viga en celosía tipo Howe, fue patentada en el año de 1840 por el arquitecto estadounidense William Howe (1803-1852), aunque ya había sido usada con anterioridad. Se usó mucho en el diseño de celosías de madera, está compuesta por montantes verticales entre el cordón superior e inferior. Las diagonales se unen en sus extremos donde coincide un montante con el cordón superior o inferior. Con esa disposición las diagonales están sometidas a compresión, mientras que los montantes trabajan a tracción (Cridlebaugh, 2008).

Ilustración 103 Viga Howe.

La viga en celosía tipo Pratt, originalmente fue diseñada por ingeniero estadounidense Thomas Willis Pratt (1812-1875) y su padre Caleb Pratt en el año de 1844, la viga representaba la adaptación de las celosías al uso más generalizado de un nuevo material de construcción de la época: el acero. A

diferencia de una celosía Howe, en este diseño las barras están inclinadas en sentido contrario, de manera que las diagonales están sometidas a tracción mientras que las barras verticales están comprimidas (Cridlebaugh, 2008).

Ilustración 104 Viga Pratt.

La celosía Warren, fue patentada por los ingenieros ingleses James Warren (1806-1908) y Willboughby Monzoni en el año de 1848. El rasgo característico de este tipo de vigas en celosía es que está formada por una serie de triángulos isósceles (o equiláteros), de manera que todas las diagonales tienen la misma longitud. Típicamente en una viga en celosía de este tipo y con cargas aplicadas verticalmente en sus nudos superiores, las diagonales presentarán de manera alternada esfuerzos a compresión y a tracción (Cridlebaugh, 2008).

Ilustración 105 Viga Warren.

La viga tipo Vierendeel, en honor al ingeniero belga Arthur Vierendeel (1852-1940), tiene como características principales las uniones obligatoriamente rígidas y la ausencia de diagonales inclinadas. De esta manera, no aparecen formas triangulares como en la mayoría de las vigas en celosía, sino una serie de marcos rectangulares. Se trata por tanto de una estructura empleada en edificación por el aprovechamiento de sus aperturas (Cridlebaugh, 2008).

Ilustración 106 Viga Vierendeel.

La necesidad de que no actúen cargas más que sobre los nodos, junto con la de tener elementos que no sean excesivamente robustos, da lugar a la viga K que logra una separación entre los nodos de la mitad de los cordones de la viga Warren, así, como la disminución de montantes y diagonales (Margarit & Buxadé, 1972).

Ilustración 107 Viga en K.

El desarrollo de la teoría de las vigas se sigue de cerca y se les atribuye a S. Whipple (1847) y D. Jourawski (1850) para el método de uniones; A. Ritter (1862) por el método de secciones; K. Culmann (1864), C Maxwell (1864), L. Cremona (1872), y R. Bow (1873) por la solución gráfica de las vigas; y A. Möbius (1837) y O. Mohr (1874) por el arrojado de la determinación estática de las vigas (Schueller et al., 1983).

Las Exposiciones Universales y las terminales de tren.

En la segunda mitad del siglo XIX, ingenieros y arquitectos usaron vigas y arcos de hierro y acero, no solo empleándolos en puentes como se ha mencionado, sino también empezaron a ser empleadas para otros usos, como estructuras de grandes luces en mercados, edificios para exhibiciones y estaciones de tren. Convirtiéndose las vigas en celosía en un paso importante en el desarrollo de los grandes progresos estructurales que empezaron a surgir en esta época de la construcción de edificaciones, teniendo como primer gran ejemplo el Palacio de Cristal para la Exposición Universal en Hyde Park, Londres en 1851, construido y diseñado por el proyectista y paisajista inglés Joseph Paxton (1803-1865), terminando su construcción en aproximadamente un tiempo de 4 a 6 meses, empleando la prefabricación como herramienta principal para su producción y montaje, para buscar lograr los tiempos establecidos, variando este tiempo de conclusión de su construcción dependiendo de los diferentes autores de libros y artículos.

Ilustración 108 Elevación de un marco y detalle de unión de un marco, Palacio de Cristal, 1851 (De Bures, 1988).

El Palacio de Cristal tenía unas medidas aproximadas de 564 m de largo, 124 m de ancho y una altura de 33 m, la superficie cubierta era aproximadamente de 74,000 m². Un metro cuadrado de construcción del Palacio pesó finalmente 5.35 kg aproximadamente (Friebe, 1983).

Probablemente el primer gran ejemplo de una estructura temprana de bóveda cañón arriostrada, fue la construida sobre la nave central de la gran estructura diseñada en el Palacio de Cristal. Esta estructura es un ejemplo claro de una bóveda cañón arriostrada prefabricada de una capa, consistente en una retícula rectangular de costillas modulares circulares prefabricadas y miembros longitudinales, rigidizada por elementos diagonales de barras delgadas contra cargas asimétricas (Z. S. Makowski, 1986).

Ilustración 109 Interior de la bóveda cañón, Palacio de Cristal, Londres, 1851.

El edificio completo del Palacio de Cristal fue planeado en una retícula modular, basada en las

Ilustración 110 Sistema estructural de un módulo y nodo de unión, Palacio de Cristal (Wachsmann, 1961).

distancias entre los centros de los soportes. El marco consiste en columnas estandarizadas huecas de hierro fundido, donde el diámetro exterior de estas columnas fue siempre el mismo, pero el espesor de los perfiles en muros varió dependiendo de las cargas que acarreaban. Es por eso que fue posible producir en masa las vigas y armaduras, así como las columnas, empleando dimensiones unificadas estandarizadas. Las armaduras fueron de tres tipos: hierro fundido, hierro forjado remachado y de madera. Las conexiones en las columnas delgadas de hierro fundido tomaron la forma de semblantes estandarizados, el cual fueron todas iguales, sirviendo para dar a la estructura mayor rigidez y estabilidad. La estructura fue completamente diseñada libre de superficies masivas como muros y de suficiente rigidez transversal ante los esfuerzos (Wachsmann, 1961).

El arriostramiento contra viento es un elemento integral del diseño general del Palacio, este es determinado por el sistema estático escogido, como los entramados en celosía. La acción de sujeción en el final de las cuerdas superiores e inferiores hace una importante contribución a la rigidez transversal de la estructura. Dentro de un marco de producción en masa, fueron usadas técnicas industriales con una precisión remarcable resultando en elementos prefabricados que dan por si solo al edificio un efecto visual global (Wachsmann, 1961).

Ilustración 111 Estación St. Pancras, Londres, 1866
(B. London, 2014).

Ilustración 112 Palacio de Cristal (Friebe, 1883).

En efecto, el Palacio de Cristal marca visiblemente el punto de rotura y cambio entre dos eras radicalmente diferentes en la historia de la construcción. Lo que es fascinante de la estructura completa, fue que está compuesta íntegramente de pequeñas partes simples (Wachsmann, 1961).

Es notorio observar el desarrollo que se dio con la aplicación de la máquina y utilizando una menor cantidad de mano de obra, además del desarrollo de vigas en celosía para diversas soluciones. La industrialización y prefabricación empieza con la construcción del Palacio de Cristal en 1851, al marcar el éxito de la construcción de proyectos manufacturados capaces de ser contruidos en tiempos cortos. Además del entendimiento de una nueva forma de diseñar y construir para lograr la terminación de manera temprana de una estructura ligera, cuyos módulos correctamente aplicados utilizando un sistema de rigidización por medio de la triangulación de la mayoría de sus elementos, lo que logro dar como resultado una estructura totalmente prefabricada y posteriormente montada, disminuyendo el empleo de materiales y mano de obra necesaria para su ejecución.

Ilustración 113 Estación de King's Cross, Londres, 1852 (Hufton+Crow).

Casi simultáneamente a la construcción del Palacio de Cristal, se empezó la construcción de la estación de King's Cross, de Londres, y la Gare de l'Est, de París, culminando en el año de 1852. En 1866, con la estación de St. Pancras en Londres construida con una luz de 78 m, se estableció el record europeo en esa época (F. Hart, Henn, & Sontag, 1976).

Ilustración 114 Gare de l'Est, de París, París (Lafond, 2012; Seince).

El rápido desarrollo de las técnicas de manufactura del hierro y su calidad, fueron de fundamental importancia en la construcción del siglo XIX, y a principios del siglo XX, principalmente para la construcción de cubiertas ligeras de grandes luces, como ejemplo las estaciones de tren en diferentes partes de Europa y Estados Unidos.

Ilustración 116 Armadura y detalles de unión,
Central de Trenes, Bremen.

Ilustración 115 Estación de trenes Dresden Neustadt, 1901 (Schmitt,
1911).

La regla de estas grandes estructuras consistía en grandes arcos rigidizados por miembros en diagonales, arriostrados e interconectados con costillas bidimensionales dentro de una estructura realmente en tres dimensiones (Z. S. Makowski, 1986).

Posteriormente al Palacio de Cristal en la Exposición Universal de París de 1889, se consolida el auge que se venía dando en la época con los nuevos conceptos de diseño aplicados a la construcción principalmente de dos estructuras: La Galería de Máquinas y la Torre Eiffel.

La Galería de Máquinas, fue diseñada por el arquitecto francés Charles Louis Ferdinand Dutert (1845-1906) teniendo como ingeniero estructural a Victor Contamin (1840-1893) de origen francés.

Ilustración 117 Perspectiva interior de la Galería de Máquinas (Friebe, 1983).

Es interesante observar, que no se tenía registro de una estructura con esta distancia de luz entre apoyos hasta ese momento, aplicando los principios de diseño dentro del aumento constante de las dimensiones y seguir las leyes generales de álgebra, pero que al llegar a un cierto punto se convierte la cantidad en una mejor calidad al referirse a las dimensiones de la edificación. Las distancias en las grandes luces de las propuestas estructurales no se contemplaron como una complicación que preocupe al hombre, sino que su pensamiento lo lleva a soluciones nuevas y simples, algunas veces ingeniosas. El nombre de esta solución ingeniosa: *Arco de tres articulaciones* (Friebe, 1983). Esta es una solución estructural uniendo los pórticos en tres puntos, en sus dos bases y en su cumbrera, marcando por lo tanto un punto de inflexión en las construcciones posteriores de las estructuras de grandes luces, al lograr tener un método de fácil unión y montaje, cuyo trabajo estructural ante la capacidad de absorber los diferentes esfuerzos y cargas, marcan el éxito de la construcción de las grandes estructuras libres de apoyos intermedios del siglo XIX.

**Ilustración 118 Detalles de unión tipo de cumbrera y
piernas de pórticos, Galería de Máquinas (De Bures,
1988).**

La Galería de Máquinas fue demolida en el año de 1910, lo que significó una pérdida para la historia de la ingeniería y la arquitectura, como también lo fue la pérdida del Palacio de Cristal (Friebe, 1983).

Ilustración 120 Interiro de la Galería de Máquinas (Friebe, 1983).

La Torre Eiffel erigida en París entre 1887 y 1889 por la empresa del ingeniero francés Alexandre Gustave Eiffel (1832-1923), diseñada por el arquitecto francés Charles Léon Stephen Sauvestre (1847-1919) con el apoyo de los ingenieros estructurales franceses Maurice Koechlin (1856-1946) y Émile Nouguier (1840-1898). La Torre Eiffel intento ser la principal atracción de la Exposición Universal de París de 1889. “Es una espléndida ilustración de puntales y pilares pesados desglosados en celosías finas” menciona Wachsmann (Wachsmann, 1961).

La Torre Eiffel se convirtió en la primera estructura de altura construida, siendo la Exposición Universal de Filadelfia del año 1876 la que presento los primeros avances hacia esta dirección, al diseñarse una torre en conmemoración de la declaración de la independencia de los Estados Unidos de América, llamada la *Torre Centenario*, de 300 metros de altura aproximadamente, la torre fue diseñada por los ingenieros estadounidenses Clark y Reeves en el año de 1874, cuyo esqueleto estructural fue formado por soportes tubulares y anillos horizontales como refuerzos transversales en los campos intermedios, en el centro se encontraba un núcleo de acero a base de un tubo para la colocación de escaleras. Aunque la torre nunca fue construida, en su diseño muestra

arriostramientos en diagonal para la rigidización de la estructura en cada uno de los módulos ortogonales formando una celosía tipo Long, que se forma en la retícula entre los elementos verticales y los anillos horizontales que trabajarían principalmente a tracción, evitando que la estructura tienda a deformarse.

Ilustración 121 La Torre Centenario, Filadelfia, 1874 ("Centennial Exposition," 2014).

Aunque en la Torre Eiffel se emplean celosías fabricadas en dos dimensiones, donde estas fueron remachadas juntas en forma de vigas cajón, por lo que la forma en como son usadas estas vigas en celosía, vienen a ser cercanas en hacer funcionar la torre estructural como un diseño en tres dimensiones. Es por eso que a la compañía de Gustave Eiffel es considerada por algunos autores como el responsable del desarrollo de los elementos espaciales. Eeckhout en su libro menciona, "Las vigas espaciales desarrolladas por Eiffel pueden ser consideradas como si fuera un ensamble de vigas de dos dimensiones" (Eekhout, 1989), lo que corrobora el planteamiento de un trabajo preliminar y cercano a proponer por primera vez una estructura espacial.

Ilustración 122 Detalle de armado triangular de módulos, Torre Eiffel, 1889 (De Bures, 1988).

Ilustración 123 Fotografía histórica de la Torre Eiffel, París, 1889 (Friebe, 1983).

Para cada uno de los elementos se hicieron los dibujos y cálculos con la máxima precisión, que a su vez requirieron del uso de logaritmos comunes para su cálculo y solución estructural.

Todas las tolerancias de las perforaciones necesarias se calculaban matemáticamente aproximadamente a $1/10$ de milímetro, lo que hizo posible completar la prefabricación de las piezas fuera de sitio, y posteriormente una fácil instalación y precisión en el perforado de los agujeros se dio a los 57.50 m, donde el primer agujero tuvo que ser cambiado (Friebe, 1983). “El uso sistemático de remaches, y pequeños ángulos y placas hicieron posible efectos estáticos previamente inconcebibles” (Wachsmann, 1961).

Ilustración 124 Detalles de unión de armaduras, Torre Eiffel, París, 1889 (De Bures, 1988).

Ilustración 125 Pie de la Torre Eiffel (Friebe, 1983).

En la segunda mitad del el siglo XIX se da un desarrollo imponente de las cúpulas de acero. En Alemania este desarrollo fue influenciado por el ingeniero Johann Wilhelm Schwedler (1823-1894) (quién es considerado padre de construcción de cúpulas arriostradas por primera vez utilizada en Berlín para cubrir un depósito de gas), Hennenberg, Mohr, Müller, Breslaw, S.Charowxky y Zimmermann, el sistema Schwedler fue por primera vez publicado en 1866, que mostro ser una retícula básica tipo formada con diagonales para funcionar como un arriostramiento, actuando como un poliedro que es estáticamente determinado e indeformable, desde que la superficie entera es dividida en triángulos, funcionando como si fuera una estructura tridimensional que satisface las condiciones estáticas de rigidez. También a finales del siglo XIX, el profesor alemán August Otto Föppl (1854-1924), mostro las ventajas de la utilización de las bóveda cañón a detalle en su libro *Das Fachwerk im Raume* en el año de 1892. En su idea original, Föppl empleaba cierto número de vigas de celosía

Ilustración 126 Domo Schwedler, Berlín, 1875
(Kurrer, 2012).

dispuestas siguiendo la longitud de la bóveda y sostenida por unas armaduras transversales o muros (Howard, 1960; Z. S. Makowski, 1968).

Estas cúpulas y bóvedas cañón diseñadas en Alemania a finales del siglo XIX, marcan un avance notable, principalmente en el diseño de las cúpulas en comparación con las construidas a principios del mismo siglo, al usar elementos diagonales, formando una retícula triangular para la rigidización de las costillas radiales en forma de arco con los anillos horizontales que evitaban su deformación al comprimir los arcos, estos elementos en diagonal permitirían una estructura más ligera y estable al arriostrar sus elementos estructurales principales.

Ilustración 127 Cúpula para depósito de Gas, Berlín, 1875 (Dimcic, 2011;
"Johann Wilhelm Schwedler," 2013).

August Föppl, a finales del siglo XIX, atrajo la atención de diseñadores estructurales, al mostrar ciertos tipos de bóvedas cañón ligeras de acero y ya en el año de 1892 produjo su primer intento para determinar la distribución de tensiones en este tipo de estructuras. La bóveda cañón original introducida por Föppl, consistía en varias vigas en celosía, que abarcan el largo del cañón y era soportada por los

frontones. Después de la conexión de los refuerzos longitudinales de las vigas en celosía, estas empiezan a ser parte de la bóveda cañón al ser arriostradas del tipo de una estructura de una capa (Z. S. Makowski, 1986).

Ilustración 128 Bóveda cañón arriostrada de August Föppl (Föppl, 1892).

August Föppl, también es reconocido por algunos autores como uno de los primeros científicos que han introducido investigaciones concernientes a vigas de acero en tres dimensiones al igual que Gustave Eiffel, pero los primeros reales intentos en diseñar y realizar estructuras de acero espaciales, y que es referido por varios autores, son del científico e inventor británico Alexander Graham Bell (1847-1922) en el año de 1907, quien es mundialmente conocido como el inventor del teléfono (invención que en el año 2002 se cataloga como posible inventor al italoamericano Antonio Meucci en el año de 1860), posteriormente muchas investigaciones de Graham Bell fueron centradas en experimentos aeronáuticos.

Vladimir Grigoryevich Shukhov (1853-1939).

A finales del siglo XIX, el ingeniero ruso Vladimir Grigoryevich Shukhov, fue uno de los ingenieros más distinguidos y versátiles de la época, sus proyectos e investigaciones tienen grandes influencias posteriores para el desarrollo de estructuras reticulares, al ser el primero en aplicar una retícula Diagrid en sus diseños tanto en estructuras horizontales como de altura y consolidarse como el padre de las estructuras basadas en paraboloides hiperbólicos.

Ilustración 129 Alzado y planta, Torre de Agua, Nizhny Novgorod, 1896.

Como ingeniero en jefe de la compañía Bari en Moscú, Shukhov ideó una multitud de innovaciones técnicas y patentes, que van desde la construcción naval hasta la ingeniería del petróleo. Shukhov había empezado a construir bóvedas cañón de tipo reticular en el año de 1890, cuando cubrió dos estaciones de bombeo en Grozny, Rusia. Vista en planta, la estructura tenía la forma de una red en forma de diamante, que fue creada por dos capas de elementos que corren en forma inversa (Shukhov, 2013).

Vladimir Shukhov es el primero en emplear las estructuras con retículas diagonales (diagrid) en sus soluciones para sus propuestas en forma de paraboloides e hiperboloides de revolución como la Torre de Agua para la exposición en Nizhny Novgorod, Rusia en el año de 1896, con una altura del hiperboloide de 25.60m. Posteriormente construye un faro empleando la misma técnica de diseño y construcción tipo Diagrid para el puerto de Adziogol, Rusia. (Beckh & Barthel, 2009; Meyer Boake, 2014).

Ilustración 130 Torre de agua en Nizhny Novgorod, Rusia, V. Shukhov (Shukhov, 2013).

Ilustración 131 Faro, Adwiogol, 1910 (Shukhov, 2013).

Ilustración 132 Torres de transmisión, Oka, 1927 (Shukhov, 2013).

También patentó su sistema para cascaras reticulares de curva sencilla en 1895, e implementó este tipo de estructuras en varios lugares, sobre todo para la exposición de toda Rusia en Nizhny Novgorod en el año de 1896. En esta exposición, se utiliza este sistema para una variedad de pabellones, que abarca una superficie aproximada de unos 20.000 m², con tramos que van desde los 12,8 m a 32 m.

Ilustración 133 Pabellón redondo, Exposición de Nizhny Novgorod, 1896, V. Shukhov (Brumfield, 1991).

En el año de 1897, Shukhov diseñó y construyó una nave de producción para una empresa de estructuras de acero en el pueblo de Vyksa, en esta cubierta, Shukhov forma el cordón superior de los marcos después de una parábola, permitiendo de este modo un sistema de cascara reticular continua y evitar así la interrupción en la cresta. Al mover una línea generadora de curva a lo largo de una curva parabólica, Shukhov construyó la primera estructura de en forma de cascara reticular doblemente curvada (Beckh & Barthel, 2009).

En los años siguientes, Shukhov desarrolló numerosas estructuras de varias cascaras de acero reticulares y los utilizó en cientos de edificios como: las cubiertas superiores de los edificios públicos y objetos industriales, torres de agua, faros de mar,

Ilustración 134 Nave de producción, Vyksa, 1897
(Beckh & Barthel, 2009).

mástiles de los buques de guerra y apoyos para líneas de transmisión de energía. Las estructuras en forma de hiperboloides de revolución y cascaras reticulares aparecieron en el extranjero sólo 10 años después de la invención del Shukhov.

Ilustración 135 Nave de producción, Vyksa, 1897 (Beckh & Barthel, 2009).

Posteriormente la torre de radio en Shabolovka o mejor conocida como Torre Shukhov construida en el año de 1922, en Moscú, se convirtió en la más alta de las torres de Shukhov, gracias a su estructura reticular, la cáscara de acero de la torre Shukhov experimenta una carga mínima contra viento, que es el principal peligro para los edificios en altura. Las diferentes secciones de la torre son hiperboloides de rotación de cavidades simples, fabricadas con perfiles rectos y las que acaban por descansar sobre cimentaciones circulares. La estructura de acero colado, combina resistencia y ligereza: utilizó tres veces menos metal en la altura de la Torre Shukhov, que en la altura por la unidad de la Torre Eiffel en París. De acuerdo con el proyecto inicial, la Torre

Ilustración 136 Detalles de unión, Torre Shukhov, Moscú, 1922 (Shukhov, 2013).

Ilustración 137 Planta de Torre Shukhov.

Ilustración 138 Torre Shukhov, Moscú, 1922 (Shukhov, 2013).

Shukhov contaba con una altura de 350 metros y tenía una masa estimada de sólo 2.200 toneladas, mientras que la Torre Eiffel en París con la altura de 350 m y pesaba 7.300 toneladas, pero durante la guerra civil, el gobierno no pudo encontrar suficiente cantidad de perfiles de acero para realizar el primer proyecto de la torre, por lo que Shukhov tuvo que desarrollar un segundo proyecto de la estructura de la torre con una altura de 148,5 metros, poco menos de la mitad de la altura del primer proyecto planteado (Shukhov, 2013).

Shukhov, fue el primero en el mundo en inventar y utilizar en la construcción a los cascaras reticulares de metal en forma de colgantes y cubiertas en forma de arco, además de torres empleando el hiperboloide de revolución como geometría principal, así como la construcción de la

Ilustración 139 Detalles de cubierta de cuatro aguas
(von Raumfachwerken & Kurrer, 2004a).

primera estructura Diagrid aplicada a estructuras en horizontal y en vertical (Meyer Boake, 2014; Shukhov, 2013).

El desarrollo de la retícula y la forma a principios del siglo XX.

Con el término del siglo XIX y principio del siglo XX, se puede observar una diferencia de enfoques entre ambos siglos, diferencia que empieza a surgir en la construcción de las estructuras reticulares, ya que están en el camino de remplazar las armaduras pesadas por miembros pequeños prefabricados, cada uno formada por una parte de una armadura espacial o tri-direccional y siendo posteriormente elementos espaciales estructurales con el invento de Graham Bell.

Posteriormente, arquitectos como Antonio Gaudí, Le Corbusier, Oscar Niemeyer, Eduardo Torroja y Félix Candela entre otros, utilizarían geometrías planteadas principalmente en forma de paraboloides hiperbólicos e hiperboloides de revolución, en muchos de sus trabajos creativos empleados para la construcción de estructuras y el diseño de proyectos arquitectónicos. Autores de cascaras reticulares modernos son Frei Otto, Norman Foster, Frank Gehry, Santiago Calatrava, todos ellos con una influencia del trabajo de Vladimir G. Shukhov.

Ilustración 140 Casa habitación empleando el sistema de retícula Lamella en el año de 1922 (von Raumfachwerken & Kurrer, 2004a).

Es importante mencionar la rápida aceptación de las estructuras que se pueden construir con un pequeño número de componentes idénticos a principios del siglo XX, como el sistema de cubierta reticular de madera tipo Lamella, el origen del desarrollado por el arquitecto alemán fue en el año 1906, Friedrich Reinhardt Balthasar Zollinger (1880-1945) de Dessau. El sistema que desarrolla Zollinger en este año consistía en construir edificios de forma rápida y barata, el sistema se denominó *Método de hormigón en masa*, buscando la manera de optimizar sus procesos de construcción. Posteriormente desarrolló un sistema de fabricación de cubiertas de fácil fabricación, el sistema consistía en unidades Lamella de delgada madera, las cuales eran atornilladas o clavadas juntos en sus puntos de conexión, formando una estructura reticular diagonalmente organizada en una capa cilíndrica, basado en la forma geométrica del rombo para el desarrollo de la retícula. El principio del sistema fue desarrollado y patentado en el año de 1921 (Z. S. Makowski, 1986; von Raumfachwerken & Kurrer, 2004a). Este sistema de reticulado aplicado a estructuras, posteriormente sería adoptado por grandes arquitectos como Pier Luigi Nervi en el diseño y construcción de sus diseños, principalmente de sus bóvedas y cúpulas de hormigón prefabricado y de acero, como ejemplo estuvieron los hangares en Orvieto, Italia.

Ilustración 141 Patente de la estructura para cubierta de Gustel R. Kievitt (R. Kievitt, 1959).

Posteriormente este sistema de reticulado en estructuras tipo Lamella, sería muy popular en Alemania antes de la Primera Guerra Mundial y su uso se propago rápidamente a Suecia, Noruega, Holanda, Suiza, Polonia y Rusia. Fue introducido por el arquitecto estadounidense Gustel R. Kievitt (1902-1964) a Estados Unidos en el año de 1925, quien posteriormente haría modificaciones al reticulado tipo Lamella para generar su propia propuesta y patentarla en el año de 1959 (Z. S. Makowski, 1968; R. Kievitt, 1959).

En la primera mitad del siglo XX, contrario a siglos previos, las cascaras para cubiertas fueron basadas principalmente en formas geométricas puras, como esferas, cilindros, paraboloides elípticos y paraboloides hiperbólicos, contruidos principalmente de hormigón. Su evolución se consolidaría en la segunda mitad del siglo XX.

Alexander Grahnam Bell, el desarrollo de las estructuras espaciales, los nodos y módulos prefabricados.

Otro avance y desarrollo, uno de los más importantes en la evolución de las estructuras reticulares se dan a principios de siglo XX, siendo Alexander Graham Bell el inventor, se ocupó entre otras cosas y principalmente en investigaciones con problemas de aerodinámica, aeronáutica, construcción de barcos, ciencias de la ingeniería, medicina, ingeniería eléctrica y genética.

Ilustración 142 Alexander Graham Bell mostrando el sistema estructural basado en el tetraedro (Wachsmann, 1961).

Pero nuestro interés es en las estructuras del aire diseñadas por Graham Bell. Aunque a Graham Bell se le acredita la invención de las estructuras espaciales, Wolfgang Schueller (Schueller et al., 1983) en su libro menciona que el origen de las estructuras desde el punto de vista espacial y espiritual se remonta a la Grecia clásica de Pitágoras y Platón, pasando por la geometría islámica de sus ornamentos influenciando posteriormente la arquitectura geométrica del periodo Gótico.

A través de los años se han producido una gran variedad de nodos prefabricados aplicados en sistemas estructurales reticulares, teniendo en Alexander Graham Bell no solo al precursor de las estructuras espaciales, sino también al precursor del empleo de los nodos y sistemas reticulares modulares prefabricados, empleadas en las estructuras propuestas para la construcción de sus cometas y torres.

Alexander Graham Bell en la búsqueda para un sistema estructural viable para emplearlo en la fabricación de un papalote, descubrió que teniendo un armazón en forma de tetraedro posee un grado remarcable de propiedades de resistencia y ligereza, con esta forma da el máximo de resistencia con el mínimo de material (Prentice, 1961a), y con el empleo de la prefabricación de unidades y nodos de unión logran diseñar estructuras que fueran rápidas de fabricar en comparación a las primeras propuestas de los papalotes y máquinas voladoras. Por esto es notorio que el Dr. Bell sea considerado el

Ilustración 143 Uno de los varios sistemas de conexión
(Prentice, 1961a).

Ilustración 144 Módulo estructural tubular
prefabricado (Wachsmann, 1961).

Ilustración 145 Conexiones tridimensionales
estandarizadas y nodos colados de Graham Bell
(Wachsmann, 1961).

padre de las estructuras espaciales, así como de las uniones a base de nodos tridimensionales o módulos estandarizados prefabricados para la construcción de estructuras más eficientes y fáciles de construir, lo que plantearía el inicio a ideas posteriores para investigadores y constructores, y así poder desarrollar proyectos de estructuras espaciales de manera fácil, económica y rápida.

El climax de los experimentos arquitectónicos de Bell con las estructuras tetraédricas, fue una torre de observación en Beinn Bhreagh, cerca del estado de Baddock, Nueva Escocia. Cada unidad para la torre consistía en 3 piezas de 4 pies de tubos hierro galvanizado ordinario y 4 tuercas conectoras. Las unidades, por si mismas, fueron unidas en el campo por una mano de obra inexperta. La torre se terminó en septiembre de 1907 llegando a una altura de 80 pies (Prentice, 1961a). La torre se convirtió en una de las primeras estructuras de acero espaciales que usó nodos colados y miembros tubulares fue esta torre de observación de Beinn Breagh, siendo el origen de los nodos prefabricados y la aplicación tubular para la construcción de estructuras reticulares.

Ilustración 146 Cometas diseñados por A. G. Bell
(Prentice, 1961a).

Ilustración 147 Torre de observación, Beinn Breagh, 1907 (Wachsmann, 1961).

Graham Bell también diseñó cometas, que finalmente fueron tan grandes que eran capaces de levantar un hombre en el aire. Para lograr esto, el desarrolló un sistema estructural de relativamente pequeños marcos espaciales, basada en el tetraedro como módulo geométrico de la estructura. Combinando un número arbitrario de estos pequeños elementos en forma de panel de abeja, Graham Bell desarrolló técnicas para la unión de miembros, el cual fluyen de la naturaleza de la conexión tridimensional por sí mismo (Wachsmann, 1961).

Graham Bell reconoció la extraordinaria fuerza de estos diseños, usados también para propósitos de construcción y la prefabricación de sus elementos. Él concibió tetraedros prefabricados, estandarizados, con una producción en masa

fabricados de varillas y tubos de metal, donde estos arribaban era donde se ubicaban los proyectos de las estructuras a construir, el cual ya había anticipado en contribuciones posteriores para el desarrollo de sus sistemas estructurales abiertos (Wachsmann, 1961). Todo esto fue posible de fabricar por el uso de maquinaria, equipos mecánicos y otras ventajas de la industrialización, que ya se habían consolidado en esa época, en conjunto con el inicio de la prefabricación y modulación de sus elementos, metodologías que empezaban a jugar un papel importante en la construcción y desarrollo de estructuras ligeras, progreso que a mediados del siglo XX sería esencial para lo que se considera el mayor punto de cambio histórico, y quizás el más importante en la construcción y diseño de estructuras reticulares que influirían en el diseño posterior de nuevas propuestas aplicadas en edificaciones.

Esta prefabricación de sus elementos estructurales planteo por primera vez un sistema reticular estructural que en su mayoría era industrializado, sistema empleado para la construcción y fabricación de las diferentes estructuras que diseñó, aunque no fue comercializado, planteo las bases para un sistema espacial totalmente prefabricado y que posteriormente se consolidaría a mediados del siglo XX con la terminación de la gran guerra.

Tomoegumi Iron Works Ltd., la transformación del plano al espacio en Japón.

Posteriormente en Japón el sistema Diamond-Truss fue desarrollado en el año de 1933 por Ichiro Nosawa, bajo la dirección del Dr. Fujio Matsushita de Tomoegumi Iron Works Ltd., ahora empresa TOMOE Corporation, siendo uno de los primeros sistemas de unión prefabricados empleados para la construcción de estructuras reticulares. El sistema Diamond-Truss surge como respuesta a la demanda que surgió a finales de los años 1920's, ante la creciente necesidad de grandes estructuras envolventes que sirvieran para poder estacionar los grandes aviones.

Ilustración 148 Sistema Tomoe Diamond-Truss(T. Corporation).

Como su nombre lo dice la malla básica que se genera serán módulos en formas de diamantes o rombos y triángulos generados por elementos lineales tipo viga en celosía, logrando diseñar estructuras de grandes luces empleando una retícula de tres direcciones, formando superficies curvas de forma cilíndrica o esférica, paraboloides hiperbólicos y en caso de ser necesario se podría llegar a desarrollar formas libres en años posteriores. Debido a la formación de una estructura tridimensional de doble capa, este sistema es eficiente para generar estructuras planas de gran rigidez, sus miembros trabajan de manera efectiva en todo momento y los esfuerzos se distribuyen de manera uniforme. Sus elementos básicos son perfiles de acero tipo ángulo y placas (T. Corporation; Z. S. Makowski, 1990; Youichi et al., 2009).

Eduardo Torroja (1899-1961), de las cascaras de hormigón a las cascaras reticulares.

Eduardo Torroja nació un 27 de agosto de 1899 en la ciudad de Madrid, España. Fue un Ingeniero de Caminos convirtiéndose en uno de los grandes representantes y especialistas del empleo de hormigón para la construcción de cascaras, lo que no le impidió realizar proyectos aplicando una solución reticular triangular en el diseño de sus estructuras, en algunos casos variando el tipo de material empleado.

Ilustración 149 Frontón Recoletos, Madrid, 1935
(Antuña Bernardo, 2003; CEHOPU).

Ilustración 150 Modelo del Frontón Recoletos, Madrid, 1935 (López Benito, 2013).

Aunque las propuestas reticulares de Torroja empleando una solución reticular previó el periodo de estudio, un ejemplo que sobresale fue el Frontón Recoletos que fue construido en Madrid en el año de 1935, el proyecto es del arquitecto Secundino Zuazo y se comienza a trabajar su diseño a comienzos de 1935, siendo el hormigón el material escogido convirtiéndose en uno de los precedentes que emplea la retícula triangular con este material. “La cubierta es una lámina cilíndrica de dos lóbulos de sección circular de diferente radio, ambos con tangente vertical en los extremos y que se encuentran en ángulo recto. Las generatrices son horizontales, de 55,00 m de largo y están orientadas en la dirección longitudinal. Parte de la superficie continua se sustituye por una estructura de barras trianguladas, todo ello de hormigón. La sección consiste en dos arcos de circunferencia, la mayor de 12,20 m de radio y la menor de 6,40 m, que se cortan ortogonalmente. De esta forma la luz, en el sentido transversal, es de 32,51 m. La distancia entre ejes

Ilustración 151 Campo de Futbol de Les Corts,
Barcelona, 1942 (CEHOPU; Navarro & Balboa,
2005).

de apoyo, en el sentido longitudinal, es de 55,0 m” (Antuña Bernardo, 2003). Claramente Torroja empieza a observar la capacidad de aligerar sus cascaras por medio del empleo de retículas aunque su objetivo en el Frontón Recoletos fuera el de la iluminación del interior.

Ilustración 152 Campo de Futbol de Les Corts, Barcelona, 1942 (CEHOPU).

También logra conseguir una forma compleja al emplear la técnica de traslación de una curva compleja por un eje, logrando emplear armaduras aplicando el diseño de celosías en la cubierta del Campo de futbol de Les Corts en Barcelona en el año de 1942. La cubierta básicamente son vigas en cantiléver de 25.30 m en celosía tipo Warren sin apoyos intermedios (Navarro & Balboa, 2005).

Otras propuestas serían realizadas por parte de Torroja después de la Segunda Guerra Mundial, empleando materiales metálicos para la construcción de sus cascaras lo que muestra un claro reconocimiento a la facilidad de construcción y ligereza que estas planteaban, y empezando a marcar el punto de cambio del empleo del hormigón

Ilustración 153 Domo Zeiss, Jena, 1922 (Bandel et al., 1987; Krausse).

a materiales metálicos como aluminio o acero, punto de cambio que se consolidaría con Félix Candela en el Palacio de los Deportes de la Ciudad de México.

Franz Dischinger, el empleo del hormigón armado para la construcción de cascaras (1887-1953).

Franz Dischinger nació un 8 de octubre de 1887 en Heidelberg, Alemania, recibiendo el título de Ingeniero Civil en el año de 1907. Su trabajo por la preocupación para la construcción de una cascarina inicia cuando conoce al arquitecto Walther Bauersfeld, al trabajar como director de investigaciones de Carl Zeiss en Jena, cuando Bauersfeld diseñó el Planetario Zeiss. Juntos desarrollaron una novedosa solución donde el principio de diseño del domo fue la elaboración de una malla de acero, siendo los nodos, denominados nodos Zeiss donde las barras de acero fueron dispuestas radialmente y que a su vez estaban conectados a los nodos adyacentes, logrando construir un domo ligero de acero, empleando 3840 barras de acero. Posteriormente la malla de acero fue rodeado por una malla de alambre para poder aplicar a continuación el hormigón por medio de un lanzado. La red tuvo un peso de 9kg/m^2 .

Ilustración 155 Domo Zeiss, Jena, 1922 (Bandel et al., 1987; Krausse).

La novedosa malla generada en tres direcciones generada por Bauersfeld y Dischinger se plantea y acerca a la propuesta a la retícula geodésica de Fuller, donde inclusive algunos de los estudios de Bauersfeld con respecto al proyector necesario para ser empleado en el Planetario, requirió de un estudio de descomposición de la esfera capaz de proyectar los filmes en todo el interior del domo puede mostrar su influencia en los trabajos posteriores de Fuller como el desarrollo del Dymaxion Map y el Domo Geodésico.

Ilustración 154 Cúpula Schott, Jena, 1924 (Bandel et al., 1987; Günschel, 1966; Krausse).

Ilustración 156 Proyector fijo de estrellas. Walther Bauersfeld, 1926 (Krausse).

Dischinger no limitó sus trabajos reticulares en el Domo Zeiss para la construcción de cascaras o inclusive las cimbras diseñadas para los encofrados donde es importante observar la similitud de los nodos de los encofrados del Großmarkthalle de Frankfurt con los nodos Triodetic desarrollados posteriormente por A. Fentiman.

Ilustración 157 Grossmarkthalle, Frankfurt, Franz Dischinger, 1928 (Peseke et al., 2010).

Los trabajos previos de Pier Luigi Nervi (1891-1979).

En los años previos, durante y posterior a la Segunda Guerra Mundial, se dieron grandes avances y propuestas para el desarrollo de estructuras ligeras como se ha observado, que influenciarían posteriormente en la época dorada del desarrollo de las estructuras ligeras que se dio a mediados del siglo XX, además de que influenciarían a las estructuras que se diseñan y construyen en la actualidad. Durante estos años, arquitectos e ingenieros ante la necesidad que exigía la guerra y posteriormente la posguerra, se proponen diseños atrevidos y ligeros para atender a la problemática que se presentaba por las necesidades que requería la construcción de la época ante las carencias que se generaron.

Es precisamente en esta época, donde uno de los grandes representantes de las estructuras reticulares surge. Pier Luigi Nervi fue un ingeniero de origen italiano, cuyos proyectos y edificaciones fueron principalmente construidos en hormigón, convirtiéndose en iconos de la arquitectura e ingeniería mundial.

Y es en el proyecto de los hangares de Orvieto, basado en una retícula de arcos cruzados, donde se forma una geometría tipo bóveda cañón reticular tipo Lamella de elementos prefabricados de acero, que se convierten en un ejemplo de estructuras reticulares y que ayuda en el entendimiento del desarrollo de las estructuras ligeras posteriores. Entre los años de 1935 y 1942, Nervi construye 8 hangares empleando dos materiales diferentes, hormigón y acero, hangares que fueron destruidos durante la Segunda Guerra Mundial, cuyos trabajos fotográficos han evitado que queden en el olvido. Los primeros dos hangares fueron construidos en los años de 1935 a 1938 y los siguientes 6 fueron construidos entre los años de 1939 a 1942 (C. Chiorino).

Los seis hangares posteriores tenían unas medidas ligeramente variables entre los 100 m x 26 m x 12.50 m, sufriendo mejoras con respecto a los primeros dos hangares donde las principales características de esta transformación fue la simetría de los soportes que fueron reducidos a seis apoyos, y el aligeramiento de la estructura por medio de elementos prefabricados reticulares. También se anularon las tablas armadas de ladrillo, siendo sustituidas por viguetas

prefabricadas de hormigón armado sobre las que se fijó la cubierta de placas (Paolo. Desideri et al., 1982)

Ilustración 158 Elementos reticulares de los hangares
(Paolo. Desideri, Pier, & Giuseppe, 1982).

Ilustración 159 Hangar de Orvieto (C. Chiorino).

Con estas modificaciones en los hangares, Nervi ahorro el 30% de acero, 35% de hormigón y el 60% en cimbras de madera (Prentice, 1953c), planteando así una ideología de ahorro que se consolidaría con el final de la guerra.

La comercialización del nodo prefabricado, el nodo MERO.

En Europa, en el año de 1936, una patente proporcionaría las bases para el desarrollo de un sistema prefabricado industrializado de fácil montaje, por medio de la fabricación de un nodo producido en masa denominado sistema MERO, construyendo su primera estructura en el año de 1940 y siendo el primero en comercializarse en el año de 1942, este sistema fue inventado por el ingeniero alemán Max Mengerlinghausen (1903-1988), quién con su patente ayudó a revivir el interés por las estructuras espaciales (von Raumfachwerken & Kurrer, 2004b).

Ilustración 160 Sistema MERO (von Raumfachwerken & Kurrer, 2004b).

El sistema de conexión MERO, consiste principalmente en una bola esférica tratada de acero forjado en caliente con al menos 18 agujeros roscados en ángulos diferentes. La esfera tiene caras planas alrededor de los agujeros para mejorar el asentamiento donde los orificios son perforados con precisión. El tornillo que es insertado en la perforación ubicado en el miembro tubular, pasa a través del cono soldado al final del tubo (Ramaswamy et al., 2002).

Alberth Kahn (1869-1942), las estructuras de hangares y fábricas.

Consecutivamente en Estados Unidos, el arquitecto estadounidense de origen alemán Albert Kahn, fue un representante en el desarrollo de las estructuras ligeras de este país, diseñando y construyendo diferentes tipos de proyectos tanto en hormigón como en acero. Dentro de sus más de 1,000 proyectos diseñados y en específico de estructuras ligeras de grandes luces, principalmente metálicas, donde se encuentran la construcción de hangares de grandes luces que sirven para dar solución a la problemática que se presentaba para el guardado de las nuevas aeronaves que se diseñaban de gran tamaño (Chilton, 2000; Wachsmann, 1961).

Ilustración 161 Hangar para aviones en Quonset Point Naval Air Station 1940-1941 ("Ancientfaces," 2000).

En la industria de la aeronáutica los aviones crecían más y más, por lo que las luces de los hangares debían de incrementarse para poder acomodarlos, principalmente durante y después de la Segunda Guerra Mundial. El jefe de ingeniería de Kahn, Joshep Matle Jr. dice: "Durante la guerra nosotros no nos atrevimos a salir en cualquier camino de los diseños convencionales por miedo a los retrasos. Desde entonces ha habido tiempo para estudiar y experimentar. Han llegado algunos nuevos conceptos, el cual proveen luces máximas y espacios libres, a costos mínimos" (Prentice, 1952d).

Ilustración 162 Zona de prensas donde A. Kahn elimina dos terceras partes de las columnas en la fábrica de Chrysler (Prentice, 1951b).

Uno de los diseños más interesantes de los Hangares de A. Kahn, es el marco de forma circular. Pero uno de los proyectos de estructuras ligeras metálicas,

Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Arquitectura – D.C.T.A.

Ilustración 163 Edificio de ensamblaje, Glenn L. Martin Co., Baltimore (Nelson, 1939).

más interesantes de la época durante la guerra para cumplir una necesidad en la fabricación de armamento, fue el proyecto para la fábrica de Chrysler, no solo por la complejidad del proyecto, sino también por su gran tamaño y las necesidades del cliente por cumplir.

Cuando Chrysler firmó un contrato por 99 millones para fabricar pesados tanques, su primer movimiento fue llamar a Albert Kahn Associates y poner a su orden la construcción de una nueva planta. Y ¿porque Chrysler tenía que construir una nueva planta?, la respuesta es simple, no hay una planta disponible con la estructura suficientemente pesada para soportar las cargas que generan las grúas que son necesarias para cargar las piezas. El incremento de tamaño y peso provocado por los nuevos productos necesarios para la guerra se convierte en solo una de las razones, y aquí se mencionan otras (Prentice, 1951b):

- Hay pocas plantas existentes con un área suficiente para instalar los equipos.
- Tamaño y complejidad de la maquinaria. Pocas plantas tienen luces suficientes de tamaño que permitan la instalación eficiente de la maquinaria.
- Operaciones que requieren de precisión y muchos nuevos procesos requeridos.
- Pocas plantas proveen suficiente flexibilidad en operaciones.
- Mientras la escasez de materiales se encuentran en el punto de mira, la escasez de mano de obra calificada podría superar a la anterior,

Ilustración 164 General Motors Corporation
Tonawanda, Nueva York (Nelson, 1939).

convirtiéndose en la gran desventaja para la producción que requiere la defensa de Estados Unidos.

- Muchas plantas en ciudades metrópolis están buscando localizaciones en comunidades más pequeñas.

Ilustración 165 Ford Motor Company, Detroit, Albert Kahn, 1909
(Rappaport).

Albert Kahn, no solo trabajó para la General Motors, también diseñó la mayoría de los edificios de Ford durante la primera mitad del siglo XX, incluyendo la expansión de la planta de Highland Park, la planta de River Rouge, y la mayoría de las plantas de ensamblaje de rama en todos los EE.UU. y en el extranjero. En el momento en el que Ford Motor Company anunció su intención en 1908 para construir la planta de Highland Park para fabricar el Modelo T, la reputación de Albert Kahn ya era

Ilustración 166 Isométrico de unión del sistema
Mobilar (Wachsmann, 1961).

Ilustración 167 Marco principal ubicado en la cabeza
de una columna (Wachsmann, 1961).

conocida por los funcionarios de Ford por el diseño de la planta de Packard, sólo a unas pocas millas del sitio de Highland Park. Algún tiempo después de que la compañía decidió construir la planta, se selecciona Kahn como su arquitecto, comenzando una larga relación entre Kahn y Henry Ford. Kahn fue responsable de casi la totalidad de la generación de plantas de ensamblaje rama de los años 1920's, incluidos Richmond ("Ford Richmond Assembly Plant,").

Albert Kahn, aunque fallece en el año de 1942, propone estructuras cuyos costos eran comparables e inclusive menores con proyectos de estructuras anteriores e inclusive de la misma época, cuyo tamaño era menor, además de la menor distancia entre apoyos con las que se construían, Kahn incrementa la distancia de las luces, logrando ofrecer mejores características proyectuales en la solución de sus estructuras, que se adapten a los nuevos procesos de producción que se empiezan a desarrollar ante la creciente demanda de los productos de la industria automotriz y para la fabricación de máquinas para la guerra.

Konrad Wachsmann (1901-1980), en búsqueda del nodo universal.

También durante el proceso de la guerra en los años de 1944 y 1945, el arquitecto estadounidense de origen alemán Konrad Wachsmann, desarrolló un sistema para estructuras de grandes luces con pocos apoyos, del cual ya había hecho algún trabajo preliminar en Francia hacia finales de los treintas. Este sistema fue subsecuentemente nombrado

Mobilar structure, y su desarrollo fue patrocinado por el Atlas Aircraft Corporation (Wachsmann, 1961).

El sistema Mobilar Structure consistió en miembros tubulares de varios largos de medidas estándar, con placas oculares colocadas en offset y soldadas en cada final del tubular, ensamblados en cualquier combinación de final de viga, columna, cuerdas, etc. Un ejemplo de aplicación de este sistema es un hangar de medio tamaño para aviones, con acceso sin restricciones en cada uno de los lados.

Ilustración 168 Propuesta de Hangar, Konrad Wachsmann (Wachsmann, 1961).

La unidad básica del hangar consiste en dos marcos principales, al cual son unidas vigas secundarias de tipo cantiléver. El hangar con esta propuesta puede ser expandido como se desee, adicionando unidades similares en el otro lado. Los marcos principales son soportados por un par de columnas construidas con los mismos elementos estructurales. Mientras el uso de elementos tubulares le da a la estructura suficiente rigidez en la dirección longitudinal, estos están arriostrados con cables en la dirección transversal, ya que el tipo de unión seleccionado no permite que los miembros sean conectados en ángulos rectos, lo que otorgó mayor estabilidad a la estructura ante los diferentes empujes (Wachsmann, 1961).

Esta propuesta aunque compleja en su fabricación pero fácil en su montaje, sería la base para la propuesta de un proyecto posterior de un gran hangar al desarrollar otro sistema de unión, ante la búsqueda obsesiva de Wachsmann por desarrollar un nodo universal que sirviera para cualquier tipo de

estructura, esta nueva propuesta le daría gran reconocimiento a las investigaciones y propuestas de Wachsmann a nivel internacional.

Para el estudio de las estructuras reticulares en el periodo de tiempo propuesto, se plantean tres etapas de investigación que ayuda a proyectar y entender como se dio el desarrollo de las estructuras reticulares triangulares en base a las edificaciones que se diseñan y construyen en cada etapa, así como los avances y desarrollos que se dan en las tecnologías empleadas, y la generación de las geometrías que empezaron a surgir a partir de la segunda mitad del siglo XX, incluyendo de manera importante del desarrollo del término Diagrid empleado principalmente en edificios de altura.

Ilustración 169 Esquema de desarrollo de contexto histórico de estructuras reticulares, 1800-1946 (Diseño propio).

2.2.Desarrollo de las estructuras espaciales y laminares reticulares de 1946-1960. El desarrollo de la tecnología y la forma, adaptada a la transformación de estructuras bidimensionales a estructuras reticulares tridimensionales.

La posguerra como factor determinante de la técnica estructural.

El desarrollo de las estructuras en el período de la posguerra, da inicio al terminar la Segunda Guerra Mundial en el año de 1945, marcando un punto de cambio en el diseño y construcción de estructuras ligeras, principalmente en el uso de fábricas, edificaciones militares y de grandes hangares ante las nuevas amenazas que representan el inicio de la Guerra Fría que inicia al término de la Segunda Guerra Mundial y posteriormente con el inicio de la Guerra de Corea, lo que planteó en el inicio de los años 1950's el acaparamiento de materiales como el acero, principalmente para la fabricación de armamento, teniendo como ejemplo la producción de tanques de guerra, así como el desarrollo tecnológico de las industrias necesarias para su fabricación, las que requirieron de nuevas edificaciones para satisfacer las nuevas necesidades para la fabricación de sus productos y maquinarias. Otro ejemplo se plantea con la fabricación de los nuevos modelos de grandes aviones, que requirió de la construcción de grandes hangares con estructuras de grandes luces y posteriormente de estructuras capaces de cubrir los grandes espacios de espectáculos. Al terminar la guerra, la construcción se centró en la reconstrucción industrial y de energía.

Estas edificaciones empleadas para uso bélico, fueron estandarizadas y repetidas en muchos casos de manera efectiva logrando disminuir costos de proyecto y producción, observando que las estructuras que trabajan a tracción eran las más económicas, aplicando un estandarizado que fue iniciado en la primera mitad del siglo XX. Es importante mencionar que esta prefabricación e industrialización surgida en Estados Unidos fue tomada como referencia por Gran Bretaña para mejorar sus procesos.

“Hay un movimiento en la planeación durante este periodo, llevado por Mies Van der Rohe, para crear un esqueleto estructural estandarizado, alrededor de

Ilustración 170 Domo reticular tubular para un aviario de 30 m de diámetro, 1950 (Prentice, 1950c).

Ilustración 171, Fábrica de tractores SOTREQ, Marcelo Milton y Mauricio Roberto, Río de Janeiro, 1950 (A., 1951).

elementos estandarizados prefabricados que son empleados para crear volúmenes funcionales. La estandarización de la producción en fábrica y el control son necesarias para la prefabricación” (Newby, 1954).

La principal característica del mundo de la posguerra en la construcción es la escasez de materiales, lo que hizo que el precio de los materiales se incrementara, ya que en su mayoría fueron empleados para la construcción de armamento como ya se ha mencionado. Además otra característica fue la escasez de mano de obra calificada ya que fue en muchos casos fue utilizada como soldados durante la guerra, y que posteriormente ante la finalización de la guerra era necesaria para la construcción de las nuevas edificaciones empleadas para satisfacer las necesidades que la sociedad seguía requiriendo, para el desarrollo principalmente económico y social de los países del mundo principalmente afectados con la Segunda Guerra Mundial. Otra problemática que se planteó fue la necesidad de casas para los soldados que regresaban a sus países, ante la escases que esbozaban muchos de los países devastados al final de la guerra, e inclusive ante el crecimiento poblacional que se empieza a mostrar en los años 1950's, con lo que esta necesidad de casas habitación se incrementaba. Por lo que buscan con la finalización de la guerra, ante estas problemáticas y muchas otras, optimizar el consumo de materiales, disminuir los tiempos de construcción, emplear la menor cantidad de mano

Ilustración 172 Auditorio Nacional de la Ciudad de México, Hugo Enrique Díaz Moro, 1952 (Prentice, 1952b).

Ilustración 173 Domo geodésico para granero, Montreal (Prentice, 1954g).

de obra especializada, transformando así las estructuras cuyas cargas eran transmitidas bidimensionalmente a estructuras que transmitirán los esfuerzos tridimensionalmente a lo largo de las envolventes, empleando a la industrialización y mecanización como factor para la optimización de los procesos de producción empleados para la fabricación de las edificaciones.

El desarrollo de las estructuras reticulares triangulares de este periodo será precedido como ya se ha mencionado por el desarrollo de nuevas formas y estructuras, empleando sistemas reticulares prefabricados que empezaron a surgir, utilizados en sistemas de estructuras espaciales y tri-direccionales, que puedan desempeñarse de manera óptima para la transmisión de los esfuerzos que se generen en una estructura. Los ejemplos más notables fue el diseño de los nodos de unión y módulos prefabricados, para el diseño y construcción de estructuras como lo fueron los sistemas de nodos diseñados en la primera mitad del siglo XX, entre ellos los empleados por Alexander G. Bell para la construcción de sus estructuras espaciales, posteriormente el sistema Diamond-Truss empleados en la construcción principalmente de domos en Japón, posteriormente del sistema de mayor empleo como lo fue el nodo MERO y finalmente el sistema Mobilar de Wachsmann empleado para el diseño principalmente de hangares.

Estos sistemas que se convertirían en la base para el diseño de posteriores sistemas

prefabricados de unión y modulares, que se convertirían en una herramienta para la generación de propuestas de estructuras reticulares y que en conjunto con los avances que se desarrollaban en los procesos de montajes, sistemas y procesos constructivos, desarrollos tecnológicos y de materiales que se darán durante este lapso de tiempo, contribuyeron para convertir esta etapa de mitad de siglo en la época dorada de la evolución y de desarrollo de las estructuras reticulares, donde investigadores, inventores y constructores como Max Mengerlinghausen, Arthur E. Fentiman, Stéphane du Château y Fujio Matsushita entre otros, se convertirán en los grandes promotores de los sistemas de unión y modulares industrializados, para la prefabricación de las estructuras espaciales reticulares y nodos de unión inventados por Graham Bell a principios del siglo XX.

Además en este periodo de tiempo, grandes investigadores, diseñadores y constructores como Konrad Wachsmann, Robert Le Ricolais, Eduardo Catalano, Z. S. Makowski y Richard B. Fuller entre otros, realizaron descubrimientos y patentes que servirían para el desarrollo actual y futuro de las diversas estructuras reticulares de la época, y cuyos progresos servirán para poder analizar y determinar las diversas influencias que participan en el desarrollo de la retícula triangular aplicada en el diseño de la geometría de la estructura y en la evolución de las edificaciones en los años posteriores, al sentar las bases para su construcción.

En resumen, en este periodo de tiempo que comprende entre los años de 1946 y 1960, grandes representantes surgen con propuestas tecnológicas y formales aplicados a estructuras reticulares, donde desarrollan investigaciones que concluyen en nuevas propuestas constructivas innovadoras para la época, además de que contribuyen a consolidar las estructuras ligeras reticulares con las ideas planteadas, y posteriormente ante la aceptación de las propuestas, plantear a las estructuras reticulares como una opción y en varios casos como la mejor opción para el diseño y construcción de proyectos, principalmente de grandes luces y posteriormente de altura, al lograr optimizar los recursos, disminuyendo así uno de los factores que influyen en la toma de decisiones como lo son los costos finales de construcción. Por lo que al analizar a cada uno de estos constructores e investigadores, se podrá obtener un mejor entendimiento

Ilustración 174 Auditorio Municipal, Corpus Cristi,
1952 (Prentice, 1954g).

Ilustración 175 Teatro de Mannheim, Mies van der
Rohe, 1953 (Bloc, 1958c).

de los factores que influyen en el desarrollo de las estructuras reticulares de este periodo de tiempo y los posteriores, en conjunto con sus construcciones y propuestas diseñadas.

Asimismo, el entendimiento de estas investigaciones y desarrollos tecnológicos de las técnicas constructivas desarrolladas y que surgen en la segunda mitad del siglo XX, sirven también como base para el entendimiento de la evolución de la geometría de proyectos (factor importante en el desarrollo de las edificaciones), empleando los sistemas constructivos y estructurales de las retículas triangulares innovadores que surgen durante este periodo, que aplicadas al diseño y construcción de las soluciones estructurales planteadas, se llegan a fortalecer con los diseños de los proyectos posteriores de finales del siglo XX y principios del siglo XXI, ante la complejidad y elegancia de las formas que proponen sus diseñadores.

Se puede resumir que en los años 1950's el espíritu de la búsqueda de lo que se llamaba *la nueva arquitectura*, se puede resumir en tres ventajas, de las cuáles se tienen que revisar los esfuerzos colectivos de los desarrolladores (Belluschi, 1953):

- La exploración de la estructura como fuente de la forma. Para tratar de clarificar la compleja relación entre los aspectos estéticos y el estructural con los requerimientos constructivos de la edificación de la época. Afirmación importante en la arquitectura contemporánea.

- Nuestros intentos para entender más profundamente la naturaleza humana, y proveer formas que satisfagan las demandas físicas y emocionales. Lo que plantea a la forma como necesidad cotidiana y se convierta en parte de la solución arquitectónica del proyecto para generar confort.
- Los intentos de muy pocos intelectuales de la época por ser creativos para encontrar símbolos estéticos visuales en el mundo, el cual es un camino para perder el significado de su destino, en muchos conflictos elevados por la ciencia. En los años 1950's se plantean propuestas estructurales y arquitectónicas basadas en el ahorro y en la optimización, por lo que muchos constructores y diseñadores no planteaban a la forma como una necesidad del proyecto. Aunque a finales de esta década la búsqueda de una forma estética empieza a convertirse en un objetivo de los diseñadores.

Los proyectos y las edificaciones, la técnica constructiva como solución de las necesidades arquitectónicas después de la guerra.

Los arquitectos, ingenieros e inventores del periodo comprendido entre los años de 1946 a 1960, perfeccionaron en muchos casos tecnologías existentes de años anteriores, al optimizar sus procesos de empleo de la consolidada industria de la construcción aplicadas a las estructuras reticulares. Además emplearon nuevos materiales aplicados a los nuevos sistemas y/o técnicas reticulares que empezaban a surgir, como los nodos de unión prefabricados y desarrollo de tubulares, siendo Francia el país que lideraba en la construcción tubular en los años 1950's, pero en a partir de los años 1960's, fue muy bien conocido de los rezagos de Estados Unidos detrás de Europa en construcción tubular, sin embargo, la US Steel's National Tube Division propuso cerrar la brecha, o por lo menos disminuirla considerablemente, ofreciendo una variedad de tubos estructurales cuadrados y rectangulares lo que significó un importante ahorro de peso y el diseño de una estructura más eficiente. Basándose en un ratio más

Ilustración 176 Conventions Hall, Mies van der Rohe, Chicago, 1953 (Bloc, 1958c).

Ilustración 177 Hangares a) Nueva York b) Pittsburgh c) Greenville, 1953-1954.

elevado de tubos resistencia-peso, este desarrollo pudo hacer edificios del 30 al 40% más ligeros, pero igual de resistentes (Prentice, 1961d).

La gran diferencia entre los constructores europeos y los constructores de Estados Unidos en esta época está enfocada a la construcción tubular de la época, se deriva en la diferencia de los radios de los costos laborales a los costos del material de ambos continentes: los relativos costos altos de los materiales en Europa ha llevado a un tipo de diseño, mientras los altos costos de mano de obra en Estados Unidos ha llevado a otro tipo, esto no indica que estas aplicaciones no se encontrarán en Estados Unidos o viceversa, pero los diferentes factores empiezan a influenciar el tipo de edificaciones que se construyen. En efecto, un americano que ha mostrado esta diferencia es Richard Buckminster Fuller, quien ilustró en su trabajo la diferencia básica de las filosofías europeas y americanas en el diseño tubular. La técnica europea es basada en el mínimo de uso de metal, mientras el enfoque de Fuller es basado en el deseo de encontrar una solución económica a una gran variedad de problemas estructurales con un simple diseño. Mientras el diseñador europeo estriba en los ahorros de costos por la conservación de materiales, Fuller trata de disminuir costos por el desarrollo estandarizado de partes, las cuales son baratas de fabricar, transportar y ensamblar.

Ilustración 178 Domo de aluminio para Auditorio, Kaiser Aluminum, Hawaii, 1957 ("A new wrinkle in stressed-skin," 1957; Prentice, 1957a).

Mientras la estructura de Fuller es estandarizada en tamaño, su solución se adapta a diferentes formas y proyectos, en Europa se requiere de diferentes diseños para las diferentes situaciones. Otra diferencia aplicada al empleo de tubulares, en Europa fue la fabricación de gran variedad de tubos estructurales de gran calidad y en Estados Unidos, los diseñadores no contaban con esta variedad. (Prentice, 1960c).

Inclusive ante la desaparecida escuela de la Bauhaus como parte del movimiento moderno en la arquitectura, Mies Van der Rohe y su gusto por el empleo de los perfiles metálicos proyecta edificaciones que emplean estructuras reticulares triangulares y que no quiebran el estilo que le gustaban diseñar. Así como el desarrollo de proyectos y construcciones de SOM que siempre han estado en la búsqueda de metodologías que logren dar ligereza a la estructura.

Además de que en la completa industrialización de los nuevos sistemas estructurales que surgen en la época, se hace un llamado a una nueva conciencia por los ingenieros estructurales, en la posición y función de la estructura, y por los arquitectos en las limitaciones impuestas por el diseño y que pudieron ser resueltos con las nuevas técnicas industriales.

En este periodo de tiempo, otros investigadores, inventores y constructores sobresalen en otras partes del mundo con diversos proyectos realizados como Dr. Fujio Matsushita de Tomoegumi Iron

Ilustración 179 Domo Unión Tank Car (Baton Rouge), Richard B. Fuller, Luisiana, 1958 (Prentice, 1958b).

Works Ltd., en Japón, y que en conjunto con sus invenciones como lo sería el nodo de unión Diamond Truss con el que desarrollaría una gran diversidad de edificaciones, o el inventor del nodo de unión Triodetic Arthur Edward Fentiman en Canadá, cuyo invento sería la base de futuros nodos de unión apoyándose en su diseño en forma de un cilindro.

Y es precisamente en un simposio a principio de los años 1950's, donde se juntan 19 arquitectos e ingenieros de reconocimiento internacional para discutir sobre las estructuras espaciales, y poder definir el uso presente y sus futuras implicaciones a la construcción, probablemente es aquí donde se empieza a consolidar el empleo de las estructuras reticulares en el mundo, principalmente metálicas. En el panel de participantes se encontraban: Isadore Thompson, Dr. Walter Gropius, Dr. J. J. Polivka, E. F. Masur, Paul Rudolph, Prof. K. Hruban, John J. Driskell, Prof. Walter C. Voss, Prof. J. M. Garrelts, Edward A. Verner, Prof. George Winter, J. H. Whitney, R. Le Ricolais, R. Buckminster Fuller, Konrad Wachsmann, Fred N. Severud y Eduardo Catalano, en los resúmenes se encontraban Leonard Michaels y Félix J. Samuely (Prentice, 1953e). En su discusión se pueden resumir algunos comentarios del simposio que aportan conocimientos para el entendimiento de lo que sucedía en los años 1950's, y que influenciarían el futuro cercano de los diseños de las edificaciones, discutiendo como afectarían los avances tecnológicos a su desarrollo, además del progreso que empezaba a mostrar de las formas generadas y

Ilustración 180 Centro Internacional de Comercio,
Tokio, Mashika Murata, 1959 ("Centre
International de L'Industrie a Tokio," 1961-1962).

sistemas constructivos de estas estructuras reticulares. Se resaltan los siguientes comentarios que surgieron en el simposio:

- Isadore Thompson: "Es tiempo de que la construcción espacial sea seriamente considerada por los arquitectos" (Prentice, 1953e).
- Walter Gropius: "Los grandes ingenieros como Freyssinet en Francia, Maillart en Suiza, Nervi en Italia, Ove Arup y Samuely en Gran Bretaña, han establecido la cimentación científica para un nuevo concepto de estructura espacial para el futuro de la arquitectura" (Prentice, 1953e).
- Dr. J.J. Polivka: "Es esencial para el ingeniero el colaborar con el arquitecto al principio del diseño y sea corresponsable por el diseño básico".
- E. F. Masur: "El caso en favor de una nueva técnica estructural definida por Samuely es muy impresionante" (Prentice, 1953e).
- Paul Rudolph: "Las formas de las cuales crecen lógicamente las concepciones de Samuely aún no han sido totalmente desarrolladas" (Prentice, 1953e).
- Prof. K. Hruban: "Únicamente con el desarrollo del hormigón fue posible explotar el diseño tridimensional de la estructura aunque fuera pesada y cara" (Prentice, 1953e).
- J.J. Driskell: "En su experiencia confirma la opinión de Samuely sobre el esfuerzo a cortante en construcción de cubiertas inclinadas" (Prentice, 1953e).
- F. Samuely: "En la comparación de Driskell, está de acuerdo que con el armado de hormigón,

las mismas cargas pueden ser acarreadas de manera más barata que con acero, pero encuentra que con la construcción de techos, el hormigón trabaja mucho más pesado que el acero y este empieza a ser más barato en luces más grandes” (Prentice, 1953e).

- R. Le Ricolais. “La construcción de marcos espaciales no está limitado a las losas inclinadas trabajando bajo momentos a flexión. Los mismos a principio puede ser empleados para desarrollar formas geométricas con gran rigidez y con un peso ligero. Buckminster Fuller con sus grandes luces, logra domos geodésicos de aluminio que pesan solamente 1 lb/pie² de área cubierta. Usando una construcción de madera tridimensional similar para bodegas en la África Francesa Ecuatorial consiguieron luces de 35 pies con solo 0.7 lbs de metal” (Prentice, 1953e).
- Buckminster Fuller. “Las vigas de estrella de Samuely demuestra la unidad básica estructural de la geometría energética, porque el tetraedro encierra el menor espacio con la mayor superficie, por lo que es la forma más rígida contra las presiones exteriores. Usando estos tetraedros como una unidad modular de marcos espaciales, pueden ser soldados en una con piso tridimensional que actúa de la misma manera que una placa plana construida en hormigón, y eliminará la necesidad de vigas laterales o tapas sobre los soportes de columnas. Los esfuerzos son distribuidos equitativamente a todos los miembros en relación con su distancia desde el punto de la carga, y consecuentemente son distribuidos en círculos concéntricos que facilita el análisis de la estructura. Estructuras indeterminadas prueban ser altamente económicas porque todas las unidades estructurales y sus conexiones son estandarizados y cada uno distribuye las cargas proporcionalmente a las otras unidades” (Prentice, 1953e).
- Konrad Wachsmann. “En la construcción de marcos espaciales, una nueva forma de pensar toma lugar. Básicamente todos los soportes verticales, columnas, etc., parecen ser inadecuadas. Una estructura espacial trabaja mejor sin todos los miembros estructurales, porque sus características altamente redundantes, son reducidas a elementos

Ilustración 181 Centro comercial, David Libeskind,
Río de Janeiro, 1959 (Bloc, 1959).

pequeños eventualmente distribuidos sobre área largas” (Prentice, 1953e).

- Resumen de F. Samuely. “Un número considerable de estructuras delgadas de piel han sido erigidas en Estados Unidos pero también en Europa, el progreso de construcción estandarizada es encontrada más en hormigón armado que en acero. Samuely cree que es esencial que cada ingeniero debe ser instruido para imaginar cosas en el espacio, y no dependa en el plano y elevación para resolver estos problemas” (Prentice, 1953e).

En la misma época en Japón, es importante mencionar la influencia del ingeniero estructural Yoshikatsu Tsuboi tendría en el desarrollo de las estructuras reticulares en conjunto con el arquitecto Kenzo Tange, siendo Tsuboi el único ingeniero capaz de realizar los sueños del Tange, relación que iniciaría en los años 1950's y que se iría consolidando con el avance de los años. Aunque sus propuestas más impresionantes se realizan en los años 1960's en conjunto con Tange, su trabajo inicia posterior a la guerra.

Ilustración 182 Tokyo International Trade Center, 1959 y Sumpu Kaikan
en Shizuoka, 1957, Yoshikatsu Tsuboi (Kawaguchi, 2006).

Ilustración 183 Pabellón Z, Alexa y Lederer, Brno, 1959 (Prentice, 1963a).

Además de las propuestas de Tsuboi desarrollando cascaras de hormigón, a principios de los años 1950's, en el año de 1953 el arquitecto Eero Saarinen en colaboración con el ingeniero estructural Fred N. Severud, empezó la construcción del proyecto *David S. Ingalls Rink*, abriendo sus puertas en el año de 1959, sobresaliendo la propuesta que desarrolló como cubierta para la pista de Hockey para la Universidad de Yale, al diseñar una envolvente de doble curvatura. En el proyecto del Ingalls Rink, Saarinen empleó en arco intermedio de hormigón armado, formando una catenaria invertida trabajando a compresión, factor por lo que Saarinen empezó a ser conocido. Del arco parte una malla de cables trabajando a tracción, dando al arco intermedio y por lo tanto a la envolvente de doble curvatura. Los cables soportan una cubierta de madera y dirigen las fuerzas provocadas por las cargas asimétricas provocadas por el viento. Aunque el proyecto del Ingalls Rink no se puede catalogar como una estructura reticular, la generación de la forma generada con el empleo de dos curvaturas, se plantea como un precedente para el diseño de propuestas de formas complejas utilizando las mallas como herramienta de diseño y construcción, así como la aplicación de un sistema estructural tensado para la estabilización de la forma.

Ilustración 184 David S. Ingalls Rink, Connecticut, 1958 (Isono, 2015).

Al igual que el Ingalls Rink, la Medalla Milagrosa, iglesia construida en la Ciudad de México por el arquitecto Félix Candela en el año de 1956, y aunque los trabajos de Candela es amplio, se retoma a la Medalla Milagrosa por la complejidad de la forma generada al sobreponer diferentes paraboloides hiperbólicos. Este proyecto recuerda a las propuestas del también arquitecto español Antoni Gaudí de finales del siglo XIX y principios del siglo XX. La complejidad de la forma, aunque desarrollada en hormigón, representa también un precedente a las estructuras reticulares, complementando su trabajo en México, en conjunto al realizado por el ingeniero Francisco Castaño y Frei Otto. Es importante tomar en cuenta la influencia de las formas realizadas por los cascaras de hormigón, tomando en cuenta el comentario realizado por el Prof. K. Hruban en el simposio de los años 1950's, donde se resume la importancia de las estructuras de hormigón para el desarrollo de las estructuras reticulares tridimensionales, y se menciona que ante los altos costos y complejidad de construcción de las estructuras de hormigón entre otros factores, empezarían a dejar de ser utilizadas, ante la naciente técnica reticular aplicada a las cascaras iniciada en los años 1960's.

Ilustración 185 La Medalla Milagrosa, Ciudad de México, 1955 (Ruiz Zizumbo, 2009).

Ante la información recabada de investigadores y constructores, se resumen los siguientes proyectos y edificaciones como algunos de los más representativos en la época entre los años de 1946 a 1960, donde se pueden enumerar los siguientes, tomando en cuenta entre los constructores a los arquitectos e ingenieros ya mencionados, y donde se puede visualizar el desarrollo de las tecnologías utilizadas, formas geométricas, retículas y sistemas constructivos, entre otros factores que influyen en la evolución de las estructuras reticulares y su influencia en las estructuras posteriores.

Consolidando a las cascaras de hormigón de Candela, Nervi, Saarinen y Tsuboi entre otros, cuyos trabajos desarrollado en los años 1950's son amplios, como las envolventes precedentes a las cascaras reticulares que el mismo Frei Otto bautizaría en los años 1970's al llamarlas *Grid Shell*, cascaras reticulares que empiezan a desarrollar formas libres complejas a finales del siglo XX.

Con el diseño de las cascaras de hormigón y reticulares empleando la técnica de diseño de doble curvatura iniciada por Shukhov a finales del siglo XIX, los arquitectos e ingenieros observan un mayor grado de estabilidad y de posibilidades de generación de formas.

Como conclusión en este periodo se puede determinar a la técnica influenciada por la tecnología determinada por las nuevas invenciones y

Ilustración 186 Puente The Firth of Forth
(Wachsmann, 1961).

desarrollo de patentes como el factor determinante en el desarrollo de las mallas reticulares triangulares que influirán en la evolución de los proyectos diseñados en la búsqueda de una nueva forma y en el perfeccionamiento de un sistema estructural que se adapte a cualquier propuesta.

2.2.1. El valor del tubular como solución de la barra y el nodo como un recurso de las uniones que otorguen una solución de la tipología estructural prefabricada.

Los tubulares son por primera vez usados por los grandes constructores de puentes a mediados del siglo XIX, y refinado en su tecnología a mediados del siglo XX, la construcción tubular está enmarcando un creciente número de edificios de la época. Su resistencia estructural fue comprobada en el puente del siglo XIX The Firth of Forth de Escocia, Benjamin Baker y John Fowler fueron los responsables por el diseño del puente de tren en Edimburgo entre 1882 y 1890, posteriormente en la torre tetraédrica de Alexander Graham Bell (Prentice, 1960c).

Con las estructuras reticulares principalmente espaciales, frente a las formas y figuras generadas, se plantea el problema de las geometrías de las retículas a diseñar, teniendo el valor del nodo como la principal incógnita a solucionar, ya que en esta época sin obtener un nodo completamente rígido no es posible hacer una estructura reticular, lo que impediría lograr un crecimiento infinito de la estructura y que se adapte a la necesidad de la forma proyectada, diseñando así un concepto de crecimiento aplicado a este tipo de estructuras principalmente para un módulo dado y que a la vez puede modificar el comportamiento de la

Ilustración 187 The Package House System
(Imperiale, 2012; Wachsmann, 1961).

estructura. Aunque con el surgimiento de los nodos prefabricados, las uniones posteriormente se convertirían en más articulares, convirtiéndose en uniones menos rígidas pero con las mismas capacidades de no deformarse y absorber los esfuerzos óptimamente.

2.2.1.1. Konrad Wachsmann (1901-1980), el desarrollo de la prefabricación y los sistemas de unión de las grandes estructuras.

Arquitecto norteamericano de origen alemán, nacido en Frankfurt (Oder) en el año de 1901, para posteriormente trasladarse a Estados Unidos en el año de 1941 durante la Segunda Guerra Mundial con ayuda de Albert Einstein, posteriormente inventó en Nueva York en conjunto con Walter Gropius entre 1941-1948 (a quién había conocido en Europa antes de la Guerra), *The General Panel House*, proyecto diseñado para la producción de elementos prefabricados, *The Package House System* y posteriormente en el año de 1951 patentaría el sistema *Modular Structure* (EcuRed, 2012; Imperiale, 2012).

Konrad Wachsmann fue el creador de más de 100 patentes como muchos arquitectos de Estados Unidos que fueron prominentes en la época. Los avances tecnológicos y la fabricación industrial durante la guerra, comparten una relación simbiótica con un enfoque en sistemas arquitectónicos y estructurales, y se observa en lo realizado por los diferentes arquitectos, ingenieros e inventores durante y después de la guerra.

Ilustración 188 Nudo Universal The Package House System y The Mobilar System (Wachsmann, 1961).

El sistema The Package House, consiste en paneles estandarizados de madera compuestos para la construcción de casas prefabricadas, paneles que pueden ser usados en cualquier posición, para ser unidos con un conector metálico universal patentado tipo cuña, que fue basado en un sistema de unión de 2, 3 o 4 direcciones de conexión entre los paneles, los paneles pueden ser ensamblados en un infinito de rango de escalas y configuraciones, la casa puede ser erigida sobre una cimentación previamente construida en un día por 5 trabajadores sin experiencia, pero por dificultades económicas y diferencias con Gropius no más de 150 casas fueron construidas, pero su obsesión por un nodo de unión universal utilizado en un sistema industrializado inicia en esta propuesta (Osayimwese, 2009). Es importante mencionar que la unidad tipo de habitación y su industrialización-seriación serían propuestas en 1928 (Guerra, 2013).

Al mismo tiempo Wachsmann desarrolló The Mobilar Structure, siendo su trabajo mejor conocido. En nombre del Atlas Aircraft Corporation, Konrad Wachsmann desarrolló en los años de 1944 a 1945, un sistema para las pequeñas estructuras que constituirían la base del sistema Mobilar, desarrollando así el sistema en un año y medio, Wachsmann usaba acero tubular y un sistema de unión de su propiedad, sistema que patentó. El sistema Mobilar era similar en principio a las estructuras tetraédricas de R. B. Fuller, donde ambos compartieron notas cuando se conocieron en Chicago en los años 1950's. La principal

Ilustración 190 Retícula para hangar para la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, 1953 (Wachsmann, 1961).

característica de la conexión es la ligereza y abre precisamente en el punto donde en la construcción convencional se utiliza una gran cantidad de material, principalmente placas de refuerzo. Los tubos por sí mismo no están en contacto con la conexión, pero se mantienen a una distancia adecuada del centro de la unión, sin interferir con su doble transmisión de esfuerzos a tracción y por lo tanto separando las funciones (II, 2002; Osayimwese, 2009; Wachsmann, 1961).

Ilustración 189 Hangar Mobilar (II, 2002; Wachsmann, 1961).

Con su gran obsesión en los conectores que sirvieran como ejes de los sistemas Mobilar y General Panel House, Wachsmann empezó a estar más interesado en el proceso del desarrollo de los nodos de unión, que en el producto por sí solo y a las necesidades que se planteaban en los proyectos.

Ilustración 191 Detalle de nodo de unión de Hangar, 1953 (Wachsmann, 1961).

Ilustración 192 Diferentes combinaciones modulares para Hangar (Wachsmann, 1961).

Ilustración 193 Máquina injertadora para proceso de producción (Wachsmann, 1961).

La transformación de carpintero-arquitecto a filosofo-ingeniero fue completada cuando Wachsmann fue contratado como profesor del Instituto Tecnológico de Illinois, y posteriormente en la Universidad del Sur de California donde varios equipos de estudiantes trabajaron con él en contratos de proyectos que envolvían sistemas de análisis, estandarización, producción mecanizada y ensamblaje, características importantes en el estudio de las estructuras reticulares que tanto le gustaban y su posterior desarrollo, donde su trabajo tomaría mayor importancia después de su muerte en 1980, cuando surgieron varias preguntas sobre la industrialización, prefabricación y arquitectura, pero sobre todo en el ramo de las estructuras ligeras (Osayimwese, 2009).

En sus proyectos, Wachsmann veía a la industrialización como un instrumento para la producción en masa y como una solución a la fabricación de sus propuestas al nodo de unión, donde la máquina solo puede ser entendida como una herramienta, y deducir que al emplear la

industrialización continuamente se repite un ciclo predeterminado de una actividad, haciendo más económico el proceso de producción, dando como resultado el producir un largo número de partes iguales en un menor tiempo.

Ilustración 194 Hangar para la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, 1953 (Wachsmann, 1961).

El proyecto que mayor difusión tuvo a nivel mundial fue el realizado en el año de 1953, cuando Wachsmann fue contratado por uno de los departamentos de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, para desarrollar un sistema estructural para hangares de grandes dimensiones cuyo ensamblaje fuera rápido y sencillo. Las condiciones básicas de esta investigación, correspondió perfectamente con los principios de los métodos de producción industrializada de sus sistemas de unión utilizando las barras estructurales para completar la propuesta de la estructura reticular. Obtiene el reconocimiento ante la solución práctica en el montaje de sus elementos, pero también por los estudios sobre prefabricación que realizó a través de los años y finalmente por la búsqueda del nodo universal para dar solución a cualquier tipo de estructuras que se pudieran diseñar.

Wachsmann también encontró en la prefabricación, al módulo como unidad básica para la construcción de edificaciones y estructuras, así como la adaptación de los módulos en los materiales. Wachsmann mencionó que “el módulo es la unidad abstracta fundamental de medida, el cuál por medio de la multiplicación, substracción o división, numéricamente se determina el sistema geométrico de un orden modular dado, como una unidad modular fundamental

que necesita aplicar solo en una dirección, lo que puede resultar necesario un número de diferentes módulos o medidas, esto es perfectamente admisible sin un orden modular dado este último es hecho diferente con zonas independientes. Sin embargo, si fuera posible encontrar un balance, en el cual todos los requerimientos fueran cumplidos en medidas tridimensionales, es entonces donde el simple modulo fundamental resultante podría ser simultáneamente idéntico con un cuerpo en un orden modular. Esta unidad tridimensional de un módulo tridimensional puede ser considerada un caso ideal, esto constituye un sistema universal dentro del cual es posible fijar cualquier parte en cualquier dirección a cualquier hora, tanto en sí mismo y en relación con cualquier otra parte. En el módulo estructural se determinan las relaciones y posiciones de todos los elementos estructurales, el cual difieren de los elementos de relleno en el que ellos transmiten las cargas. En un sistema simple, este consiste principalmente de columnas y trabes, donde las vigas pueden ser también idénticas con las losas horizontales, el módulo estructural derivará esencialmente de las condiciones estáticas impuestas por las luces deseables o cantiléver, los peraltes estructurales disponibles, y los módulos de los elementos constructivos y componentes” (Wachsmann, 1961).

Aunque ninguno de sus sistemas que logro desarrollar en sus investigaciones tuvo el éxito que buscaba por la obsesión en lograr un nodo de unión universal como ya se ha mencionado repetidamente, y que sirviera para cualquier tipo de forma y estructura a construir. Obsesión que el mismo Makowski mencionaría como equivocada en su publicación para el congreso de la IASS.

La prefabricación, industrialización, modulación, así como el desarrollo de los nodos de unión, tanto en la práctica como en sus investigaciones, se convirtieron en los grandes aportes que Wachsmann deja a posteriores arquitectos e ingenieros para el desarrollo de sus proyectos, así como dar el reconocimiento a su trabajo, ya que influye en el perfeccionamiento de las estructuras reticulares.

2.2.1.2. Max Mengerlinghausen (1903-1988), el desarrollo de los nodos de unión prefabricados para su comercialización.

Max Mengerlinghausen nació el 3 de octubre de 1903 en Braunschweig, Alemania y murió a la edad de 85 años en el año de 1988. Inventores como Alexander Graham Bell, diseñadores como Vladimir Shukhov, autodidactas como Richard Buckminster Fuller y estudiosos como Konrad Wachsmann, que iniciaron sus investigaciones aplicadas en las estructuras reticulares en la primera mitad del siglo XX y donde algunos de estos investigadores en conjunto con otros, se consolidan a inicios de la segunda mitad del siglo XX. Investigadores, autodidactas, diseñadores y estudiosos entre otros, dieron los primeros pasos hacia la producción en serie de las estructuras espaciales y tri-direccionales con la conclusión de la Segunda Guerra Mundial, logrando obtener finalmente un inicio prometedor con la invención del sistema MERO. Max Mengerlinghausen tuvo éxito con su sistema estructural espacial MERO y que hasta el día de hoy continua, siendo una síntesis del diseño individual del edificio y la producción industrial, por lo tanto un nodo prefabricado en el campo de las estructuras metálicas. Mengerlinghausen logró esta hazaña en la base del pensamiento idealista objetivo que lo caracterizó, introduciendo el principio sistemático compositivo en el diseño y producción de estructuras espaciales. (von Raumfachwerken & Kurrer, 2004b).

En Berlín, Mengerlinghausen fundó la empresa MERO en el año de 1942, dedicada a sistemas de estructuras espaciales donde ahora son diseñadas y construidas en diferentes partes del mundo, cuenta con más de 200 patentes registradas.

Mengerlinghausen durante su trabajo tuvo influencias para el desarrollo de 8 códigos de construcción de estructuras espaciales que funcionarían como ejes para liderar su principio de composición para el diseño y fabricación de estructuras espaciales, siendo los 8 códigos basados en los trabajos de August Föppl y Walter Prost (von Raumfachwerken & Kurrer, 2004b):

Ilustración 195 Sistema MERO (von
Raumfachwerken & Kurrer, 2004b).

- Los marcos espaciales de geometría regular se componen de triángulos equiláteros y/o formas que surgen sólidos platónicos o formas derivadas
- Debido a la estructura regular de las armaduras espaciales son estáticamente óptimas; el nodo individual y las pequeñas diferencias de longitudes de las barras permiten la producción a escala industrial.
- Las longitudes de las barras de la estructura espacial forman una serie geométrica de crecimiento natural.
- Con diferentes longitudes de barras de la serie geométrica de crecimiento natural se puede construir a partir de los poliedros similares.
- Con los poliedros similares, los tamaños de superficies forman una progresión geométrica y una serie geométrica, además de contenidos del espacio.
- Todos estos cuerpos y descendientes de formas primarias, además de los packs de espacio compuesto resultante, pueden estar compuestos de un solo nodo universal y barras de la serie geométrica de crecimiento natural.
- El nodo universal es un poliedro de 26 caras (cuboctaedro truncado) de la serie de sólidos de Arquímedes semi-regulares, los dieciocho cuadrados tienen la misma distancia al centro del cuerpo y están provistas de orificios concéntricos.
- Para la construcción de estructuras espaciales regulares, la solución es un nodo universal con dieciocho conexiones en forma de nodo MERO-estándar.

Ilustración 196 Sección del Pabellón para
República Federal de Alemania en Osaka, 1970.

Las formas geométricas que uso Mengeringhausen para el diseño de sus estructuras espaciales por medio de su sistema patentado y al formular sus códigos de construcción ya mencionados, son los tetraedros, hexaedro (cubo), octaedro y el icosaedro, formados por triángulos básicos ante la estabilidad de su geometría. Formas geométricas de amplio uso por los arquitectos, ingenieros y constructores para el diseño de sus propuestas estructurales reticulares durante y posterior a la segunda mitad del siglo XX.

Ilustración 197 Pabellón para República Federal de Alemania en Osaka,
1970 (Föllmer; von Raumfachwerken & Kurrer, 2004b).

Posteriormente con el uso de ordenadores, que ya estaban en marcha a finales de los años 1960's y que iniciaron su empleo a principio de la misma

década, inicia una revolución en la composición teórica y práctica de las estructuras espaciales ante la rapidez en la realización de los cálculos estructurales, por lo que sería visible en el trabajo de Mengerlinghausen realizado en la Expo Universal del año 1970 en Osaka, Japón, con la construcción de la cúpula de conciertos para la República Federal de Alemania (von Raumfachwerken & Kurrer, 2004b). Los ordenadores a principios de los años 1960's, ayudaron a los ingenieros a predecir el comportamiento de las estructuras, proveyeron guías invaluable para escoger los materiales básicos y el diseño de estructuras, fueron capaces de hacer el diseño estructural de los marcos y turnándose con los dibujos, mostraron a los contratistas como organizar el trabajo de construcción de proyectos complejos con un máximo de eficiencia, y finalmente el temprano uso de los ordenadores en la industria de la construcción fue para el análisis de esfuerzos de elementos estructurales resolviendo problemas de cálculo que tardaban horas ahora en minutos (Prentice, 1962c).

La influencia y entendimiento de las bases empleadas en la ideología de diseño usando el sistema de unión prefabricado propuesto por Mengerlinghausen, así como las técnicas empleadas en la construcción de las estructuras espaciales planteadas con el sistema MERO, y su posterior evolución hasta el desarrollo de los nuevos sistemas de construcción principalmente prefabricados, donde el sistema MERO ayudó en poder determinar el camino a seguir en el desarrollo de los nodos de unión prefabricados, empleados para la construcción de las estructuras reticulares; lo que refuerzan el entendimiento de la influencia de los sistemas de unión prefabricados en el desarrollo de la geometría y dimensiones de las estructuras propuestas.

Tomando en cuenta la importancia que la comercialización y prefabricación de un nodo de unión tuvo en el diseño y el progreso de los sistemas reticulares triangulares para la construcción de estructuras como factores importantes para la toma de decisiones, al escoger un sistema de construcción reticular para aplicarlo en un proyecto, también es importante tomar en cuenta la facilidad de montaje de las propuestas diseñadas con el sistema MERO, ante la optimización que se tenía de los recursos, al disminuir la mano de obra capacitada necesaria

y por lo tanto disminuir los costos de construcción. La comercialización del nodo de unión MERO, marca un punto de cambio importante en el tiempo necesario para la construcción de las estructuras reticulares ligeras, al iniciar el desarrollo de nuevos sistemas reticulares industrializados, aplicando un nodo de unión prefabricado como el elemento importante de la técnica aplicada en diferentes partes de mundo.

2.2.1.3. Zygmunt Stanislaw Makowski, el desarrollo de la estructura espacial como solución de la envolvente.

Profesor Zygmunt Stanislaw Makowski nació en Varsovia, Polonia, en el año de 1922, siendo la investigación de su tesis sobre el análisis del Discovery Dome (que fue construido para el Festival Británico de 1951), la que iniciaría su gran interés en el estudio de las estructuras espaciales (Parke & Behnejad, 2013).

Profesor Makowski actuó como ingeniero consultor en numerosos casos, la realización de análisis estructural y diseño de cúpulas, bóvedas cañón y las retículas de doble capa de acero, aluminio y fibra de vidrio reforzado con plástico, sus estudios en el área de las estructuras espaciales, catalogación de las retículas, el entendimiento de las formas y el empleo de las tecnologías como solución de los sistemas estructurales.

Ilustración 198 Astrodome de Houston (O. Bass, 1965).

Una vez terminada la Segunda Guerra Mundial, Makowski mencionó que se da una consolidación de las nuevas técnicas de construcción que se vivía en ese periodo de tiempo con la construcción de estructuras ligeras y por lo tanto la

Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Arquitectura – D.C.T.A.

desmaterialización, entendiendo como tal la disminución de material utilizado por unidad de potencia funcional, de capacidad de producción o de volumen ocupado, afirmación que resumiría la búsqueda que se estaba dando en esa época (Z. S. Makowski, 1968). Aunque la mayoría de sus trabajos serían posteriores a los años 1960's, sus orígenes en el mundo de la posguerra como ya se ha mencionado, son los que marcarían la tendencia de sus trabajos sobre estructuras reticulares ligeras, situación que se retoma para colocar su trabajo e influencia en el progreso constante que se logra de las estructuras reticulares en el primer periodo de desarrollo de las estructuras propuesto en este trabajo.

Sus trabajos como ingeniero consultor influirían posteriormente para el desarrollo de estructuras de grandes luces como lo fue el Astrodome, en Houston, Estados Unidos, estructura que fuera considerada una de las envolventes de mayor dimensión aplicada a un espacio deportivo durante ese lapso (Parke & Behnejad, 2013).

Ilustración 199 Edificios centrales para el Congreso de la Unión Central de Arquitectos (Crosby & Makowski, 1961).

A continuación, su trabajo se vería reforzado cuando fundó entre los años de 1962 y 1963 *The Space Structures Research Centre*, donde se vería implicado su trabajo en conjunto con sus colaboradores en el diseño de estructuras de grandes luces y envolventes reticulares, que contribuirían en hacer crecer su

fama como un gran técnico y experto en la materia de las estructuras reticulares (Parke & Behnejad, 2013).

Su trabajo no se limita a la consultoría y construcción de diversas estructuras ligeras alrededor del mundo, Makowski deja un legado de más de 150 artículos y libros traducidos en varios idiomas, donde logra explicar a las estructuras espaciales, analizando todos los factores que influyen en el diseño y desarrollo de las retículas, estas aportaciones serían de mucho apoyo al contribuir con su conocimiento a desarrollos futuros. El sentido que le daría a las estructuras, también influenciarían a la forma aplicada en la concepción de la estructura reticular, a la técnica aplicada en la construcción de las estructuras, y el estudio de la estabilidad y rigidez con el menor uso de materiales como característica fundamental de toda estructura, factores de estudio que Makowski mencionaría en su libro *Estructuras espaciales de acero* (Z. S. Makowski, 1968), en donde la mayoría de las soluciones estudiadas emplean secciones metálicas y nodos prefabricados para su construcción.

Makowski en algunos de sus estudios y artículos, muestra claramente la diferenciación en las estructuras reticulares en dos tipos, diferenciación que apoya la terminología empleada por de S. du Château, al utilizar palabras para distinguir la forma en que absorben los esfuerzos y de como son planteadas las estructuras para la edificación diseñada, llamándolas estructuras tri-direccionales (actuando en un mismo plano) y tridimensionales (actuando en tres dimensiones). Los dos tipos que Makowski menciona son:

- Las estructuras de sistemas de entramados tradicionales.
- Las estructuras de sistemas espaciales.

Aclarando que las líneas de acción en los entramados tradicionales son coplanarios y en los segundos se ramifican en el espacio. Esta clasificación será importante tomarla en cuenta para el entendimiento de los sistemas estructurales reticulares aplicados y las retículas diseñadas para cada clasificación.

Es importante resaltar las características que predominan en las investigaciones de Makowski, sobresaliendo el empleo correcto de los materiales

Ilustración 200 Maqueta de cúpula, Stéphane du Château (du Château, 1957; Motro, 2013).

escogidos, la prefabricación y estandarización de sus elementos, y finalmente la utilización de menos mano de obra para su construcción (Z. S. Makowski, 1968).

2.2.1.4. Stéphane du Château (1908-1999), el desarrollo de los nodos prefabricados como solución reticular de las estructuras ligeras.

El arquitecto, ingeniero y pintor de origen polaco Stéphane du Château, nació en el año de 1908 en Solwycqodzk, Siberia. Posteriormente al terminó de la Segunda Guerra Mundial se estableció en Francia como muchos ingenieros que buscaban una mejor vida, trabajó en Francia hasta su muerte en el año de 1999, naturalizándose francés en el año de 1953. Stéphane du Château continuamente se esforzó en simplificar las estructuras, mediante la reducción de sus elementos que las constituyen. Planteando el cambio de un sistema tri-direccional a los sistemas tridimensionales (explicado anteriormente), su trabajo se resume en el uso del tubular, el nodo y la simetría hexagonal como solución de la retícula (Frapier, 2006; Obrębski & Tarczewski, 2013).

Ilustración 201 Stéphane Du Chateau (Frapier, 2006).

Ilustración 202 Detalles de la cúpula central del
I'E.D.F. de la presa de Grandval, 1958 (du Château,
1958).

El trabajo temprano de Stéphane du Château, se centró en el estudio de la construcción tubular, principalmente en el diseño de andamiajes, usando de manera notable el Tubetal H.B.R., procedimiento de los años 1950's, y que son estructuras metálicas soldadas con arco eléctrico y el Vitrex, la que fuera su primera patente, este trabajo constaba de un sistema constructivo usando cubiertas tensadas usando tornillos y barras metálicas. Su conocimiento de tubulares metálicos lo puso rápidamente en práctica para el diseño de construcciones, poniendo interés sobre todo en las nuevas soluciones que estaban surgiendo, pero fue hasta el año 1956 cuando realmente se dio el cambio de la construcción tubular en proyectos estructurales arquitectónicos con la invención del sistema modular UNIBAT (Frapier, 2006). También du Château patentaría sistemas de nodos de unión y otros sistemas modulares como el nodo SDC, Pyramitec, Tridimatec y Spherobat, siendo capaz de construir más de 250 proyectos (Frapier, 2006; Obrębski & Tarczewski, 2013).

Es importante señalar y resaltar que, “Stéphane du Château fue uno de los ingenieros más productivos en el campo de las estructuras espaciales durante la segunda mitad del siglo XX como ya se ha mencionado. Él era un especialista de la construcción tubular y trabajó en estrecha relación con Zygmunt Stanislaw Makowski que se estableció en Londres, y luego en Guildford Surrey, para el desarrollo de diferentes estructuras

reticulares, trabajando en aportaciones para mejorar las propiedades de las estructuras y su comportamiento ante los diversos empujes. La diferencia entre las dos palabras *espacio* y *espaciales* no tiene sentido en este trabajo para el estudioso francés. Stéphane du Château era un especialista de la geometría y fue capaz de hacer el diseño de todo tipo de estructuras espaciales: reticulares de doble capa, bóvedas, sistemas de doble curvatura, etc., pero siempre tenía dos preocupaciones principales en la cabeza: el nodo y el proceso de industrialización. Todas las personas que participaron en el diseño de estructuras espaciales, saben que la principal problemática a resolver es el diseño nodo” (Obrębski & Tarczewski, 2013).

La aplicación del tubo como elemento estructural y como sección de construcción, no llegó a ser posible hasta el momento en que la soldadura de arco fuera capaz de darle todas las garantías exigidas, recordando los trabajos y esfuerzos de Samuely en la aplicación de esta técnica de construcción. En este periodo de los años 1950's, la construcción tubular llevó a un auge enorme en todos los países europeos, especialmente en aquellos países donde la escasez de acero fue obligada por la economía gastada y la carencia de materiales, factores provocados por la guerra (du Château, 1956).

Stéphane du Château mencionó las características positivas de los perfiles tubulares en varios de sus trabajos y estudios, teniendo sus características mecánicas como principal propiedad, con la ventaja de su aspecto estético agradable, la ligereza remarcada y la economía que presentaba al disminuir el volumen de material empleado, tomando en cuenta los principios que varios estudiosos habían experimentado con anterioridad (du Château, 1956, 1957).

Ilustración 203 Cúpula central del I'E.D.F. de la presa de Grandval, 1958 (du Château, 1958).

2.2.2. La retícula y los materiales como solución de una metodología de la construcción.

Durante el periodo comprendido entre los años de 1946-1960, el desarrollo de la retícula en conjunto con los materiales se convirtieron en factores de influencia en la evolución de las estructuras reticulares al implementar soluciones económicas de fácil fabricación que contribuyen en la reducción del peso y en el tiempo de construcción.

2.2.2.1. Dome of Discovery, Londres, Inglaterra (1951).

La exposición Británica de 1951 buscaba conmemorar la gran Exposición Universal de 1851. Fue una exposición de escultura en pleno aire, se inauguró en Battersea Park, además de manifestaciones artísticas-científicas y literarias que se organizaron dentro de museos, de las salas de conferencia, etc. En fin, se intentó una exposición viva del urbanismo y de arquitectura para la Feria Británica de 1951, dando lugar a propuestas arquitectónicas aplicando parámetros de diseño y construcción innovadores para la época. (Bloc, 1950).

Ilustración 204 Dome of Discovery (Prentice, 1952a).

El domo fue diseñado por el arquitecto británico Ralph Tubbs en colaboración con los ingenieros Oleg Kerensky y Gilbert Roberts. Con respecto al diseño, el domo de aluminio tenía 105 m de diámetro, en esta época se encontró que no había ningún precedente para una estructura de este tipo y dimensiones, por lo que una investigación, estudio y trabajo experimental fue requerido para determinar las fuerzas que actúan en la superficie de la cubierta, y el efecto de estas fuerzas en términos de empuje y momentos a flexión de la estructura soportante (Roberts & Freeman, 1951). La falta de un precedente marca un punto de cambio en las técnicas aplicadas en la construcción de domos y cúpulas, con la aplicación de las nuevas tecnologías de construcción, así como en la aplicación de nuevos materiales y la prefabricación de la estructura, como consecuencia, el Dome of Discovery se convierte en el precedente de otros trabajos futuros y por lo tanto en un modelo tipológico de la arquitectura moderna.

Ilustración 205 Festival de Gran Bretaña, 1951 (Bradbury, 2013).

El espíritu que presidio la realización de esta edificación es del orden puramente geométrico, a partir de esferas, de círculos y de secciones cónicas. El concepto arquitectónico era un techo en forma de cúpula circular de aluminio brillante suave, apoyada solamente alrededor de su borde por puntales reticulares en diagonal dispuestas en patrón de diente de sierra o celosía tipo Warren, inclinadas hacia el exterior (Roberts & Freeman, 1951). El domo se convierte así en un ejemplo de solución geométrica de un proyecto, al tener un correcto entendimiento del comportamiento de cada elemento estructural en la solución final, por lo tanto, la geometría se consolida como un factor determinante en el entendimiento del funcionamiento de una estructura.

Ilustración 206 Planta, sección y alzados (Zygmunt Stanislaw Makowski, 1984; Roberts & Freeman, 1951).

Durante el proceso diseño del domo, fueron varios los factores que se tuvieron que considerar y que juegan un papel importante para el desarrollo futuro de las estructuras reticulares ligeras:

- “En cualquier sistema en forma de cúpula de marcos, habría sólo unos pocos miembros idénticos (en el diseño final no hay más de seis y esta falta de repetición aumentarían el tiempo y el coste de fabricación). Por lo tanto, parecía deseable mantener el número total de piezas

Ilustración 207 Secciones Dome of Discovery
(Prentice, 1952a; RIBA, 1951).

diferentes al mínimo” (Roberts & Freeman, 1951). La búsqueda de módulos de fácil fabricación.

- “También era deseable mantener el número de articulaciones principales al mínimo, porque cualquier inexactitud en ellos podrían afectar la forma de la cúpula” (Roberts & Freeman, 1951). El diseño de nodos de unión de fácil fabricación.
- “La longitud máxima de la sección de la costilla que razonablemente podría ser fabricado, transportado al sitio, y montado también, tenía que ser considerado, no sólo desde el punto de vista del fabricante, sino también con respecto a la disponibilidad de los perfiles extruidos en inusuales longitudes” (Roberts & Freeman, 1951). La prefabricación y sistemas de montaje eficientes.
- “La decisión de usar la aleación de aluminio significaba que las secciones especiales extruidas podrían fabricarse de casi cualquier forma deseable sin costo adicional. La sección transversal de los miembros era por lo tanto mucho más adaptable que en el caso de que si se usara acero” (Roberts & Freeman, 1951). Materiales y secciones de perfiles de fácil fabricación y maniobrabilidad.

Ilustración 208 Detalle de unión de contrafuertes (Godden, 2010; Prentice, 1952a; RIBA, 1951).

El espacio interior del edificio estaba delimitado por una pared circular centrada con respecto al domo y de un diámetro inferior al que tiene la estructura. La parte superior del muro es determinado por la intersección del cilindro con un cono truncado inverso con su eje, el eje del domo y por el diámetro de la cúpula. Este cono se cruzaba con una pared cilíndrica cuya línea vertical central era excéntrica con el eje vertical de la cúpula. La altura del muro y los lados del edificio fueron de 12 m, también de chapa de aluminio, con pendiente hacia el interior desde los aleros del techo en un ángulo de 27 grados respecto a la horizontal (Bloc, 1950; Roberts & Freeman, 1951).

Ilustración 209 Montaje de arcos principales (Archives, 1950; Group, 2015).

Después de considerar diversas disposiciones de marcos y retículas, además de los diferentes factores de diseño que consideraron, se adoptó un sistema de triple intersección para los arcos, utilizando los grandes círculos de la cúpula en su totalidad o parte de su longitud en el diseño del reticulado. Los trabajos comenzaron en septiembre de 1949 y se terminaron en noviembre de 1950, en el año de 1951 se inauguró el Dome of Discovery, con un radio aproximado de 111 m de diámetro en el círculo formado por los contrafuertes, la altura del domo es de 28 m aproximadamente, convirtiéndose en el domo de mayor diámetro construido hasta ese año, pesando únicamente 322 toneladas (costillas de enmarcado de aluminio, 82 toneladas; vigas de la cubierta de aluminio, correas y láminas calibre 12 para la cubierta, 128 toneladas; viga anillo de acero, 112 toneladas). En eficiencia estructural era 4 veces más eficaz que cualquier domo de acero de la época en Estados Unidos, al pesar únicamente 150 kg/m^2 contra los casi 600 kg/m^2 que pesaban los domos de acero, fue montado en 29 semanas (C. C. o. A. a. D. i. p. o. U. o. t. A. London, 2012; Prentice, 1952a; Roberts & Freeman, 1951).

Ilustración 210 Retícula de estructura (Henry, 1949; C. C. o. A. a. D. i. p. o. U. o. t. A. London, 2012).

Retomando la geometría y la retícula empleada, el domo está compuesto por arcos articulados intersectándose en tres direcciones para formar una serie de triángulos equiláteros esféricos, con 1.80 m de lado aproximadamente, evitando cualquier concentración de metal en algún punto, de una manera similar al domo geodésico de Fuller, los arcos principales del domo fueron diseñados en base a círculos máximos de esfera, lo que facilitó su fabricación, montaje y estandarización de los arcos. En resumen, The Dome of Discovery es una estructura espacial rígida compuesta de marcos de sección triangular, fabricados en aleación de aluminio con forma de casquete esférico de poca elevación, desarrollados como una superficie de rotación para la formación de una cúpula, empleó un anillo de viga de acero fabricada de 4 platinas que fue apoyada en 78 puntales de acero tubular, formando un sistema de 24 bipods articulados en la dirección radial. La estructura contó con 37 puntos nodales internos con 6 grados de libertad cada uno y 24 puntos nodales periféricos con 4 grados de libertad cada uno, y por lo tanto es 318 veces estáticamente indeterminada (Lazarides, 1952).

Ilustración 211 Viga-anillo periférica de acero (RIBA, 1951).

Bajo condiciones de carga completa a lo largo de la viga anillo perimetral, las cargas son casi uniformes a lo largo de esta, aunque hay pequeñas variaciones periódicas, lo que daría a la viga anillo una apariencia ligeramente ondulada por la deformación que estas causan, los componentes para evitar la deformación son prácticamente nulas. Estas variaciones periódicas sólo tienen un ligero efecto sobre las tensiones en la propia viga anillo, pero apreciablemente afectan

la distribución de empujes en la retícula. El panorama general es que la retícula empuja los bipods hacia el exterior, y este movimiento es resistido por el funcionamiento de la viga anillo trabajando en tracción, además en flexión vertical y horizontal, así como en torsión. Mientras los esfuerzos causados en la viga anillo por la tracción directa y por flexión son casi iguales, la viga anillo es mucho más eficaz a la tracción que contra la flexión, por lo que un sistema de lazos rectos articulados en las arañas de una llanta sería, por tanto, mucho más eficaz. Por lo que parecía más deseable que este miembro debía ser fuerte y rígido, preferiblemente con un exterior perfectamente a ras, así que se decidió que fuera de acero dulce en lugar de aluminio, con soldadura de uniones en taller y en sitio, formando una sección irregular de 4 lados (Lazarides, 1952; Roberts & Freeman, 1951).

Ilustración 212 Fabricación y transporte de arcos (C. C. o. A. a. D. i. p. o. U. o. t. A. London, 2012).

La prefabricación como técnica de construcción del domo en conjunto con el material empleado, solventarían el problema de la escases de materiales y mano de obra calificada necesaria para el desarrollo de la estructura, especialmente al utilizar el aluminio como material principal, al ser resistente y ligero. Los arcos principales fueron fabricados con una sección triangular donde las cuerdas superiores e inferior serán barras extruidas de aluminio diseñadas para la solución del domo y prediseñadas para dar solución a los arcos, además de ser unidas por diagonales a base también de perfiles de aluminio extruidos tipo ángulo, cuya unión a las cuerdas sería a base de pernos y remaches. La

configuración triangular de la sección del arco, daría mayor estabilidad a la estructura ante los empujes verticales principalmente. Los arcos serían fabricados y transportados en secciones en camiones, ante la facilidad que planteaba la técnica utilizada de prefabricación en taller y posteriormente ser armados en sitio, para posteriormente montar los arcos utilizando cimbras metálicas, en un inicio empleados para el soporte de los arcos montados.

Ilustración 213 Secciones de perfiles extruidos de aluminio (Roberts & Freeman, 1951).

La retícula triangular generada por los arcos de aluminio empleando círculos máximos de esfera que se cruzan en su trayecto en el domo como ya se había mencionado, daría la estabilidad estructural al absorber de manera eficiente los esfuerzos verticales y horizontales al evitar su deformación, para posteriormente transmitir los esfuerzos a tracción a la viga anillo perimetral. Las correas formarían una retícula triangular más pequeña en el interior de la retícula triangular ya generada por los arcos, además de colocar correas en 3 direcciones que ayuden en la fijación y soporte de la cubierta de láminas de aluminio.

Ilustración 214 Detalles de uniones (Roberts & Freeman, 1951).

La envolvente del domo estaría realizada a base de láminas calibre 12 de aluminio que fueron remachadas a las correas y que fueron colocadas sobre la estructura principal soportante de arcos de aluminio, garantizando mayor resistencia a la corrosión y disminuyendo las cargas muertas que se pudieran generar con otro material.

Ilustración 215 Cubierta de láminas de aluminio (C. C. o. A. a. D. i. p. o. U. o. t. A. London, 2012).

La geometría de la envolvente, la solución de la retícula, el sistema estructural utilizado, el empleo de aluminio como material estructural y el uso de perfiles extruidos prefabricados para la solución de la estructura más grande diseñada hasta esa fecha, se convierten en factores que hacen al Dome of Discovery en uno de los modelos tipológicos arquitectónicos a contemplar en esta investigación.

2.2.2.2. Domo para el Ford Rotunda, Michigan, Estados Unidos (1953).

Ford Motor Company originalmente construyó el edificio Rotunda, fue diseñado por Albert Kahn para Feria Universal de Chicago basado en un estilo Art Deco, la Feria fue inaugurada en mayo de 1933 y duró dos años. Después de que la feria se cerró, el edificio Ford Rotunda tuvo que ser desmontado y se mudó a Dearborn, Michigan, en la Rotunda Drive, donde se tomó 18 meses para reconstruirlo directamente en el sitio de la Oficina Central de Construcción de Ford Motor Company, donde se encontraban las oficinas centrales en la época (Hodges, 2013; Popko, 2012).

Ilustración 216 Imagen de la Ford Rotunda en la Feria Universal de Chicago 1933 (Gregory, 2013).

El edificio Ford Rotunda fue construido con marcos de acero, y recubierto de piedra caliza proveniente de Indiana, el edificio parecía una pila de cuatro engranes, cada uno disminuyendo de tamaño hacia la parte superior, característica típica del Art Deco. El edificio Ford Rotunda tuvo una altura equivalente a un edificio de diez pisos, midiendo 64 metros aproximadamente en la base, y contó con un patio central con un diámetro de 28 metros (Popko, 2012; "Tape, plastic and aluminum. Ford builds a geodesic dome," 1953).

Ilustración 217 Construcción del Ford Rotunda ("Remembering the Ford Rotunda," 2014).

Durante la Segunda Guerra Mundial, el edificio Ford Rotunda fue cerrado al público, y posteriormente se sometió a una amplia remodelación en 1952, momento en el que el patio central fue cubierto añadiendo al techo la cúpula geodésica que pesa 8.5 toneladas aproximadamente. Henry Ford no estaba contento por las investigaciones realizadas donde mostraban que un domo convencional pesaría alrededor de 160 toneladas, por lo que Henry Ford envía a sus ingenieros con Fuller, dándole así su primera aplicación comercial de su más nueva creación *el domo geodésico*. El edificio Ford Rotunda fue reabierto al público el 16 de junio de 1953, como parte de la celebración del aniversario número 50 de Ford ("Tape, plastic and aluminum. Ford builds a geodesic dome," 1953).

Descripción del proyecto, análisis de la técnica reticular aplicada a un domo.

La retícula geodésica y el empleo del aluminio (anteriormente utilizado en el Dome of Discovery) como material estructural, son la técnica empleada como solución a la estructura de la cúpula ante la necesidad que planteaba cubrir el patio central y la problemática que planteaban los muros del Ford Rotunda, al no ser lo suficientemente resistentes para soportar el peso de un sistema de envolvente aplicando una estructura de acero de hasta 160 toneladas de peso, por lo que varios esquemas y sistemas fueron propuestos como solución de la cubierta necesaria, capaz de solventar una luz de 28 m de diámetro en el patio

Ilustración 218 Edificio Ford Rotunda (Luna).

central. Mientras las soluciones estructurales de acero promediaban 195 kg por m^2 , la solución de Fuller rondaba los 6.5 kg por m^2 , por lo que su solución no solo era más económica, también más resistente al clima e inclusive ante la situación que reinaba por la guerra fría, capaz de resistir un ataque nuclear al emplear el aluminio como material estructural. El aluminio fue suministrado por Kaiser Aluminum & Chemical Corp, cuyo ingeniero de proyectos fue Donald Richter, quien fuera estudiante de Fuller en 1949 y que posteriormente realizaría proyectos de domos adaptando la técnica geodésica como solución del sistema estructural (R.B. Fuller et al., 1999; Prentice, 1958a; "Tape, plastic and aluminum. Ford builds a geodesic dome," 1953).

Ilustración 219 Ford Rotunda Dome (Luna).

En el domo se incluyó en su solución, un nuevo sistema de armadura ligera llamada *Octet Truss*, un sistema modular estructural que combina octaedros y tetraedros fabricados como struts ligeros de 90 cms aproximadamente, elaborados de aluminio y que en conjunto formaron un marco rígido, módulos que son capaces de ser sostenidos por un niño por

su bajo peso, además su estructura es totalmente triangulada. La estructura del domo fue diseñada para usar únicamente 6 largos distintos de los miembros y todas las perforaciones fueron pre-perforadas en taller, donde hubo unas 72 diferentes orientaciones de las perforaciones finales, logrando que la estructura fuera montada fácilmente debido a que las perforaciones fueron perfectamente alineadas, logrando un mejor trabajo de atornillado (R.B. Fuller et al., 1999).

Ilustración 220 Triángulo y octaedro de perfiles de aluminio (Luna; "Tape, plastic and aluminum. Ford builds a geodesic dome," 1953).

El primer paso fue diseñar la cúpula con base a un icosaedro en 16 sub-caras para ser cubiertas por el sistema Octet Truss, posteriormente se fabricaron los triángulos utilizando 3 perfiles de aluminio para posteriormente armar 4 triángulos que formaban los octaedros, cada perfil de aluminio era identificado y unido al principio con 3 bandas de Scotch Tape de diferentes colores. Posteriormente 10 octaedros fueron sujetos entre sí para formar un módulo reticular de la estructura pesando aproximadamente 1.8 kilos, facilitando las maniobras para unas sola persona (R.B. Fuller et al., 1999; "Tape, plastic and aluminum. Ford builds a geodesic dome," 1953).

Ilustración 221 Propuesta para descomponer la esfera y maqueta del domo (Luna; Popko, 2012).
Universidad Politécnica de Madrid – Escuela Técnica Superior de Arquitectura – D.C.T.A.

Los módulos de aluminio de la estructura principal se unen entre sí con cuatro tipos diferentes de piezas de fundición, tres módulos se arman juntos para formar un triángulo más grande, dentro del triángulo se tienen los 10 octaedros que son colocados en un plano y posteriormente montados en el sitio. El racimo de octaedros se junta en el sistema octaedro-tetraedro, un sistema que se puede centrar por si solo de tal manera que se puede levantar todo el grupo sin poner una simple sujeción, por lo que ningún triángulo se desarmará. Aunque, estos fueron rápidamente unidos con gran firmeza para reforzar los módulos (R.B. Fuller et al., 1999; Popko, 2012; "Tape, plastic and aluminum. Ford builds a geodesic dome," 1953).

Ilustración 222 Armado de triángulos, octaedros y armaduras (Luna).

El domo posteriormente se empezó a montar de arriba a abajo para posteriormente colocar la tela de poliéster de fibra de vidrio transparente para aclimatar de mejor manera el domo. Las armaduras fueron atadas a un mástil vertical en el Rotunda y posteriormente levantadas con gatos hidráulicos, para posteriormente montarse en la cornisa de piedra. Montando finalmente un total de 160 armaduras, 19,680 struts, 160,000 remaches de aluminio y 7 pernos de acero ("Tape, plastic and aluminum. Ford builds a geodesic dome," 1953).

Ilustración 223 Armado y montaje de armaduras (R.B. Fuller et al., 1999; Luna).

Todo el proyecto del domo fue diseñado, manufacturado, pre-ensamblado y montado en aproximadamente 4 meses de las cuales tan solo 5 semanas de trabajo en el sitio, reduciendo considerablemente los tiempos de fabricación, armado y montaje, al lograr cumplir con los tiempos establecidos.

Ilustración 224 Montaje de estructura y cubierta del Ford Rotunda Dome (R.B. Fuller et al., 1999; Luna).

El Ford Rotunda fue reabierto al público en el año de 1953, convirtiéndose en esa época una vez más en una atracción turística, hasta su desaparición al sufrir un incendio en el año de 1962. La solución empleada se convirtió en un punto de cambio no solo para las propuestas de R. B. Fuller, también por la construcción de estructuras reticulares ligeras en Estados Unidos utilizando técnicas innovadoras de diseño como lo fue la primera aplicación de la retícula geodésica, así como tecnológicas que permitieron el desarrollo del diseño aplicando la geometría como base para la solución proyectual, además de desarrollar un proceso constructivo que minimizaba el proceso de producción empleando el mínimo de mano de obra para su fabricación y posterior construcción.

Ilustración 225 Planos de detalles del construcción del Ford Rotunda Dome (R.B. Fuller, Krausse, & Lichtenstein, 1999; Luna).

Ilustración 226 Cubierta de poliéster y teselado final del domo (Luna).

Richard Buckminster Fuller logra con la construcción del domo en el Ford Rotunda comercializar su patente de domo geodésico ante el éxito de su propuesta. La influencia e ideales empleados se notaban en su trabajo, desde el desarrollo y aplicación de propuestas y tecnologías anteriores, como la prefabricación e industrialización, que en conjunto con sus soluciones aplicadas para descomponer la esfera, empleando el icosaedro como solución geométrica inicialmente aplicada en el Dymaxion Map, teniendo al estudio de teselados como precedentes de su trabajo (interés que se mostraría en el interés por los estudios de K. Critchlow), cuyas propuestas son un precedente para el desarrollo de la retícula geodésica, y posteriormente aplicar y patentar de domo geodésico. Su conocimiento en geometría de Fuller, facilitaba el trabajo para el mejor entendimiento del comportamiento de la forma de una cúpula como geometría de la estructura, que complementado con las experiencias anteriores en los estudios de Graham Bell, Dischinger y Bauersfeld, al utilizar el tetraedro como módulo de

la forma geométrica, parte también como un precedente para el diseño de sus proyectos. Fuller utiliza este conocimiento basado en precedentes en conjunto con su inteligencia y en sus estudios previos para poder descomponer la esfera con el empleo de un reticulado triangular de manera exitosa, logrando diseñar la cúpula capaz de ser ligera y resistente, fabricada de aluminio, que complementado con el desarrollo del Octet Truss como sistema modular, y la aplicación del octaedro como base de la estructura del domo del Ford Rotunda resulta en una solución reticular de dos capas, capaz de cubrir la luz requerida con un mínimo de tiempo e insumos.

Aunque en la época el desarrollo de nodos de unión se empezaba a consolidar con la fabricación industrial y la comercialización prefabricada, Fuller emplea un nodo especial para la unión de los perfiles de aluminio por medio de placas y remaches, que recuerdan a los posteriormente empleados por el sistema Unistrut en Michigan o la adecuación realizada por Kaiser Aluminum en sus domos. Aunque su solución estructural fue sencilla, su trabajo estructural fue perfecto, al rigidizar y fortalecer la estructura por medio de la triangulación, al emplear un material resistente además de ligero y finalmente la aplicación de un nodo efectivo, logrando distribuir los esfuerzos de manera eficiente sobre toda la superficie. Con el empleo del aluminio como material estructural, Fuller disminuye las cargas muertas sin disminuir su resistencia, ya que sus características mecánicas son comparables a la resistencia del acero, y en conjunto con el entramado diagonal del Octet Truss, lograba distribuir las cargas principalmente laterales, como lo fue el viento, siendo una de las grandes preocupaciones durante el proceso de diseño y construcción, por el desconocimiento que se tenía del posible funcionamiento de la nueva propuesta reticular.

Ilustración 227 Primer modelo Unistrut de estructura espacial (Michigan., 1951).

Ilustración 228 Detalles de unión de domo.

El domo del Ford Rotunda marco el inicio de una exitosa solución reticular para la construcción de domos, sistema que se consolidaría con la construcción de la esfera en el Pabellón de Estados Unidos en la Expo Universal de Montreal en 1967.

2.2.2.3. Anexo a la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Michigan, Estados Unidos (1954).

El anexo al edificio de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Michigan plantearía un punto de cambio en la forma de construir en Estados Unidos y confirmar su interés por optimizar el proceso de producción y montaje por medio de su estandarización, siendo el edificio representativo del proyecto de investigación aplicando el sistema Unistrut, haciendo realizable el proyecto patrocinado por Charles A. Attwood, presidente de la compañía Unistrut Corporation que estuvo ubicada en Wayne. El objetivo principal del proyecto Unistrut fue el desarrollar un sistema estandarizado para la construcción de escuelas y colegios de bajos

costos con un alto grado de durabilidad, flexibilidad, expansibilidad, de fácil desmontaje y fuera por lo tanto reusable, al emplear un sistema constructivo de uniones y perfiles prefabricados, que facilitarían la fabricación del proyecto muestra de un módulo anexo a la Facultad de Arquitectura que serviría como el precedente del sistema, resaltando el montaje de la estructura espacial como cubierta de la edificación, empleando un sistema reticular como solución de la cubierta y del piso suspendido, incluyendo posibles ampliaciones futuras. Este planteamiento de un sistema de unión prefabricado desarrollado a principio de los años 1950's aplicados a cubiertas de bajo costo, sería uno de los proyectos que iniciarían e interesarían a investigadores y constructores en lo referente a un nodo de unión prefabricado con posibilidades de ser industrializado en su proceso de fácil fabricación (Michigan., 1951). El nodo Unistrut marca el inicio del desarrollo de uniones de fácil fabricación y fácil montaje que no requiere de mano de obra calificada para su fabricación y montaje.

Ilustración 229 Prototipo de escuela (Michigan., 1951; Paul, 1955).

Con este proyecto, en un inicio se planteó un prototipo de escuela que serviría como base para la construcción de nuevas y futuras ampliaciones de edificaciones de estudio, solucionando la problemática al emplear el sistema Unistrut, realizando modelos de estructuras espaciales que sirvieran para modular los espacios educativos. El proyecto planteaba una solución integral con una técnica de prefabricación que planteaba la disminución de costos y tiempos de edificación similares a la que Wachsmann y Gropius propusieron con anterioridad en su propuesta The Package House System. Con esta propuesta, el reconocimiento logrado por Attwood alcanzaría el nivel internacional, ante la

Ilustración 230 Sistema Unistrut y elementos del nodo de unión (H. Coy, 1959; Paul, 1955).

Ilustración 231 Secciones y tipo de columna empleada (H. Coy, 1959; Prentice, 1955a).

prefabricación e industrialización de los sistemas de unión que desarrolló para el empleo en la construcción de las edificaciones, llevando a la realidad su primera aplicación tanto en cubierta como en piso en el Laboratorio de la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, es importante mencionar que al mismo tiempo se construyó el laboratorio para The Attwood Development Company empleando el mismo sistema constructivo.

Ilustración 232 Laboratorio de investigación arquitectónica (U. Corporation, 1958; Paul & M. Legatski, 1955).

El laboratorio fue completado en el año de 1954, esta estructura proporcionó oficinas para los miembros de la facultad, espacios para conferencias y redacción. Dando así inicio a un proceso de construcción de espacios educativos empleando el sistema Unistrut alrededor del mundo, principalmente en Estados Unidos. Reiterando que los objetivos principales de esta técnica constructiva serán diversas y factores que otorgan el reconocimiento por expertos alrededor del mundo, entre estos factores está la velocidad de ensamblaje al reducir los tiempos de construcción y por consiguiente disminuir los costos, además de la facilidad de fabricación de las placas de unión, aunque uno de sus mayores problemas para la

época, era la necesidad de que las piezas fabricadas fueran precisas, pero teniendo como ventaja la disminución de costos de la mano de obra ante la precisión de sus elementos lo que facilitaba el armado en sitio. Esta técnica de construcción busco dar solución a cubiertas, muros y pisos, empleando un sistema ligero cuya transmisión de esfuerzos fuera uniforme, dando solución como un sistema integral para la construcción total de una edificación que no solo fuera empleada como cubierta o envolvente.

Ilustración 233 Sistema Unistrut y elementos del nodo de unión (H. Coy, 1959; Paul, 1955).

En general el comportamiento del sistema estructural Unistrut empleado en el laboratorio se puede comparar con una losa de hormigón armado, siendo la principal diferencia que en la estructura espacial las fuerzas generadas deben de seguir las trayectorias previstas por los miembros, en lugar de extenderse como lo harían en una losa.

El comportamiento de la estructura espacial del laboratorio es soportado en parte por muros paralelos, la acción del sistema es primariamente unidireccional, como una losa de una pendiente, los esfuerzos viajan en línea recta hacia los soportes. Para propósitos prácticos la estructura puede ser tratada por lo tanto como un sistema de armaduras triangulares paralelas. Las barras en los planos superior e inferior que son paralelos a los soportes sirven solamente para apuntalar la estructura y para hacerla más rígida. Otra parte es soportada por columnas tipo estructura espacial, con un capitel insertado entre la parte superior e inferior del plano del marco de la cubierta, este capitel es una pequeña sección de un módulo cuadrado de la estructura espacial donde descansa la propia

columna y dos módulos cuadrados, los capiteles son la unión con la parte de arriba de la estructura del techo (H. Coy, 1959).

Ilustración 234 Cimentación, armado de piso y cubierta espacial (L'Université, 1956; Prentice, 1955a).

La ligereza lograda en relación con su resistencia confirmaba las teorías y aplicaciones de los sistemas espaciales en estructuras soportante o en envolventes de edificaciones, debido a que cuando un punto de unión alcanzaba el máximo de su capacidad de soporte, este no se colapsaba sino transfiere cualquier carga adicional a otro punto de unión vecino, logrando actuar en una unidad tridimensional. El peso total de la estructura incluyendo la cimentación fue de únicamente 80 toneladas (U. Corporation, 1958).

Ilustración 235 Interior y balcón del Laboratorio de Investigación arquitectónica (Paul, 1955; Prentice, 1955a).

Aunque la geometría de la estructura del Laboratorio de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Michigan no era compleja al ser una superficie poliédrica regular, por lo que la propuesta de la forma no planteaba un diseño innovador, pero ante el éxito de la solución de la técnica estructural y la facilidad de su manejo, así como solución integral para la fabricación de una estructura soportante y envolvente (pisos, muros y cubiertas) se convierte en un modelo tipológico. Su comportamiento estructural fue eficiente en la dispersión de los esfuerzos por su solución espacial al transmitirlo por un sistema vectorial de transferencia de cargas. El sistema Unistrut planteó como objetivos futuros lograr dar solución a estructuras de grandes luces, además de buscar lograr proponer una mayor variedad de propuestas geométricas ante las nuevas soluciones que planteaban los proyectos que se empezaban a diseñar en la época, dando inicio a un punto de cambio en la generación de la forma y la técnica de construcción buscando obtener grandes estructuras con metodologías de montaje sencillas y capaces de solucionar cualquier requerimiento en su empleo, para finalmente lograr una propuesta de formas más ambiciosas, aunque la solución final del sistema Unistrut no superó las propuestas planas, lo que limitó la aplicación a formas simples.

2.2.2.4. Richard Buckminster Fuller (1895-1983), el desarrollo del domo geodésico y las estructuras tensadas.

Richard Buckminster Fuller nació en Massachussets, Estados Unidos, en el año de 1895, en una familia acomodada, en esa época esta región era uno de los principales centros de innovación tecnológica e industrial, lo que quizás influyó en su desarrollo como inventor. Dedicando su vida a hacer que el mundo funcione para toda la humanidad, Fuller operó como un filósofo práctico que demuestra sus ideas como invenciones que él llamó *artefactos*. Fuller fue desarrollador de 25 patentes (Institute, 2015).

En 1927, después de inventar un departamento modular de fácil construcción, diseñó *The Dymaxion House* siendo la primera propuesta de forma hexagonal en planta, una casa realmente de bajo costo, producida en masa además de que podría ser trasladada en helicóptero a su ubicación, y de fácil montaje ya que solo se necesitaban unas pocas horas, fue hasta 1945 cuando inició su

Ilustración 236 The Dymaxion House (R. B. Fuller, 1942).

producción, originalmente llamada la Casa 4D. La casa utiliza una suspensión trabajando a tracción de una columna o mástil central, la casa se vendía por el precio de un Cadillac, y se planteaba que podía ser enviada a cualquier parte del mundo en su propio tubo de metal.

Hacia el final de la Segunda Guerra Mundial, Fuller intentó crear una nueva industria para las Casas Dymaxion de producción en masa ante la crisis que se presentaba por el regreso de los soldados, y que no logró consolidar. Fuller diseñó una casa que fuera calentada y enfriada por medios naturales, que generara su propia energía eléctrica, resistente a terremotos y tormentas, y fuera fabricada de materiales permanentes, materiales ingenieriles que no requirieran de pintura periódica, mantenimiento de techos, o cualquier otro tipo de mantenimiento, donde se puede cambiar fácilmente el plano de planta al gusto del cliente, por ejemplo, reduciendo los dormitorios para hacer la sala más grande para una fiesta (Bloc, 1953a; R. B. Fuller, 1944; Institute, 2015; McHale, 1962). Aunque esta patente es anterior al periodo de tiempo propuesto en la investigación, es importante hacer mención del proyecto por su importancia del interés de Fuller por la prefabricación, modulación y por el interés de la optimización de los costos que tenía en este proyecto, y que posteriormente serían la base para futuros proyectos del mismo Fuller.

Ilustración 237 The Dymaxion House (Burkhard, Koschuetzki, Thuroczy, & Bugaric, 2015; R. B. Fuller, 1944).

Otro proyecto realizado por Fuller, y relacionado a la cartografía, es el conocido como el *Mapa Dymaxion*, la proyección del mapa de Fuller es el único plano y a la vez mapa de toda la superficie de la Tierra, que revela nuestro planeta como una isla en un océano, Fuller resuelve este mapa de la superficie de la tierra dentro de un poliedro, sin ninguna distorsión visual evidente de las formas relativas y tamaños de la tierra, y sin división alguna de continentes, la idea es que las secciones del poliedro se pueden montar sobre una superficie plana para dar una imagen más real de la superficie de la tierra, de las direcciones y las distancias. El mapa fue patentado en el año de 1946 (R. B. Fuller, 1946; Institute, 2015). Al entender esta patente de Fuller, se puede comprender de mejor manera la metodología que siguió para poder desarrollar la invención que le diera fama mundial, como fue el domo geodésico aplicando el mismo sistema al emplear al icosaedro como base geométrica para descomponer una esfera y no solo llevarla al plano como lo realizó en el mapa.

Ilustración 238 Dymaxion map (R. B. Fuller, 1946).

Ilustración 239 Cúpula de cartón para la Trienal de Milán, 1954.

Después de adquirir algo de experiencia en la industria de la construcción, y el haber descubierto las prácticas tradicionales, asimismo de las percepciones que limitan severamente los cambios y las mejoras en las prácticas de construcción, Fuller examino cuidadosamente y mejoro un equipo de una estructura interior, que incluye el inodoro, la ducha y el baño como un todo en otra patente.

También estudió la estructura de las cascaras, e ideó una serie de alternativas, cada una menos costosa, más ligera y más fuerte que los edificios tradicionales de madera, ladrillo y piedra. Esto lo llevo a seguir experimentando para poder obtener mejoras en sus ideas y futuros proyectos. Fuller logró así diseñar posteriormente una propuesta de domo ligero.

Tomando como base el estudio de la geometría que tenía sobre las formas y las diferencias entre sus propiedades, Fuller siguió varios caminos en sus investigaciones, donde uno de los caminos con los que Fuller seguiría, es la de describir las diferencias en resistencia entre un rectángulo y un triángulo, al aplicar presión en ambas estructuras, el rectángulo se doblaría y sería inestable, pero el triángulo podría soportar la presión y por lo tanto es mucho más rígida, de hecho, el triángulo es dos veces más resistente. Este principio dirigió sus estudios hacia la creación de un nuevo diseño de la arquitectura, el domo geodésico, basado también en su idea de *hacer más con menos*. Fuller descubrió que su estructura esférica que había creado a partir de triángulos, tendría una fuerza sin comparación

con alguna otra diseñada o construida, logrando disminuir el peso de la estructura a tan solo 0.78 libras por pie cuadrado, por medio de una retícula geodésica en tres direcciones fabricada de aluminio y a la vez pensando en cubrir el domo con una piel de plástico (R.B. Fuller, 1954; Institute, 2015). Fuller con su propuesta busca con el empleo de la esfera, que una estructura funcione trabajando de manera simple, ya que la esfera tiende a auto-equilibrarse, por lo que la condición al aplicar un sistema espacial por parte de Fuller, logra que su esfera geodésica se auto-estabilice, lo que le permite introducir una estructura bicapa en la esfera.

Ilustración 240 Cúpula de cartón para la Trienal de Milán, 1954 (R.B. Fuller et al., 1999; McHale, 1962; Sadao, Fuller, & Noguchi, 2011).

R. Buckminster Fuller obtuvo una amplia aceptación por la comunidad arquitectónica, cuando en la Trienal de Milán de 1954 se exhibió su cúpula de cartón por primera vez. La Trienal de Milán se creó para organizar exposiciones internacionales destinadas a presentar los logros más innovadores en el campo del diseño, la artesanía, la arquitectura y la planificación urbana (McHale, 1962). Fuller mostró una gran determinación para el desarrollo de un albergue de fácil construcción y montaje, y que a la vez fuera ligero, tomando como base el estudio del icosaedro y el triángulo, logrando diseñar una estructura de retícula triangular ligera.

Ilustración 241 Domo Geodésico (R.B. Fuller, 1954).

Aunque el domo geodésico le dio a Fuller fama internacional, la patente de los tensegritys (aunque ha sido muy controvertida ante las discusiones de si Fuller es el verdadero inventor), también le otorga reconocimiento en la comunidad del diseño arquitectónico e ingenieril alrededor del mundo, ante el interés de la influencia por el desarrollo de las estructuras ligeras.

Fuller en sus estudios sobre tensegritys menciona, “fui ayudado por muchos en el desarrollo de las implementaciones inventadas aplicadas en un sistema integral y coordinado de la naturaleza, una extraordinaria ayuda intuitiva en un momento importante en su exploración de aquel descubrimiento de fuerzas discontinuas-compresión, estructuras continuas a tracción me fueron dadas por un colega, Kenneth Snelson, deben mencionarse oficialmente en sus investigaciones formales de su *Tensegridad*” (R. B. Fuller, 1961).

En sí la invención se relaciona con un sistema de construcción, el cual utiliza las propiedades a tracción de materiales estructurales para un mayor beneficio. En su patente, Fuller hace mención de una aplicación especial a estructuras de vastas proporciones como domos de grandes luces, capaces de envolver estadios o casas de una villa entera o ciudades, haciendo que este invento fuera muy ventajoso para grandes y más resistentes estructuras. Es por eso que la esencia del invento consiste en el descubrimiento de como reducir

progresivamente el aspecto de los esfuerzos a compresión en una estructura (R. B. Fuller, 1962) haciéndola trabajar a tracción para la distribución de los mismos.

Ilustración 242 Tensile-integrity structures (R. B. Fuller, 1962).

El estudio de Fuller sobre la geometría aplicada, especialmente en el entendimiento de las propiedades del icosaedro y el triángulo para el desarrollo de estructuras ligeras, aplicando las retículas y módulos en sistemas constructivos prefabricados, también es influenciado por las necesidades que la sociedad de Estados Unidos tenía, sobre todo después de la Segunda Guerra Mundial, logrando así por medio de la prefabricación, la realización de estructuras que influenciarían el desarrollo futuro de las estructuras reticulares triangulares ligeras, siendo la invención del domo geodésico y el desarrollo de las estructuras tensadas su gran herencia a la ingeniería y arquitectura.

No.	Descripción	No. Patente	Año	Imágenes
1	Prefabricated Bathroom (R. B. Fuller, 1940)	2220482	1940	
2	Prefabricated House (R. B. Fuller, 1942)	Des 133411	1942	

3	Building Construction (R. B. Fuller, 1944)	2351419	1944
4	Building Construction (R.B. Fuller, 1959a)	2881717	1959
5	Self-strutted geodesic plydome (R. B. Fuller, 1959)	2905113	1959
6	Geodesic Tent (R.B. Fuller, 1959b)	2914074	1959
7	Synergetic Building Construction (R.B. Fuller, 1961)	298624119	1961
8	Undersea Island (R. B. Fuller, 2015)	3080583	1963
9	Suspension Building (R. B. Fuller, 1964)	3139957	1964

10	Geodesic Structures (R. B. Fuller, 1965a)	3197927	1965
11	Laminar Geodesic Dome (R. B. Fuller, 1965b)	3203144	1965
12	Hanging Storage Shelf Unit (R. B. Fuller, 1983)	4377114	1983

Tabla 2 Otras patentes de interés.

Fuller para la construcción de sus domos utilizó diversos materiales para mostrar la versatilidad de su patente, además sirvió para poder entender el comportamiento de las estructuras reticulares aplicando materiales diferentes como la madera, el cartón, textiles, plásticos, aluminio y el acero, inclusive el empleo de hormigón pretensado utilizado en algunos de los ejercicios que realizó, aunque este material que empleo Fuller, no fue ampliamente desarrollado para la construcción de sus estructuras reticulares por carecer de ligereza, siendo una característica deseada por los constructores de las estructuras reticulares, además de la dificultad de la prefabricación de sus elementos y el diseño del encofrado para generar la forma deseada. Aun así el hormigón se convertiría en un material que se utiliza para el desarrollo de sistemas constructivos de estructuras reticulares, ante su capacidad de soportar los esfuerzos a compresión, como lo fue el sistema de la tridilosa y las losas construidas por L. Kahn entre otros ejemplos.

Ilustración 243 Domo Dog-Bone, fabricado de hormigón (Richard Buckminster Fuller & Marks, 1963).

2.2.2.5. Louis Isadore Kahn (1901-1974) y Pier Luigi Nervi (1891-1979), el desarrollo del hormigón como solución estructural en las estructuras reticulares.

En los años 1950's el principal desarrollo que se da en las estructuras reticulares son las estructuras espaciales metálicas principalmente en acero y aluminio. Eduardo Catalano, Louis I. Kahn y Pier Luigi Nervi utilizaron al hormigón como material principal para el desarrollo de sus estructuras reticulares triangulares, empleando en algunos casos al tetraedro como forma geométrica base para el desarrollo de las diferentes retículas estructurales desarrolladas. Teniendo como resultado que el empleo del material de construcción más utilizado desde principios del siglo XX como lo fue el hormigón no sería descartado en los años 1950's como solución de las estructuras reticulares por la facilidad de empleo en la construcción de estructuras.

Louis I. Kahn (1901-1974).

Louis Kahn nació en la isla de Saaremaa, Estonia en el año de 1901, y creció en Filadelfia, Estados Unidos. El inmigrante estonio llegó a América a la edad de tres años. (Chao, 2005a). Kahn a diferencia de Catalano, que utilizó el hormigón para el desarrollo de sus propuestas de estructuras principalmente laminares, emplea el hormigón combinado con un sistema reticular como solución en el diseño y construcción de dos de sus propuestas. En la primer propuesta empleó esta combinación como solución de forjados reticulares utilizando como base

Ilustración 244 Planta arquitectónica y detalle de forjados de la Galería de Arte de la Universidad de Yale, 1953 (Elleda & Katan, 1962-1963; Giurgola, 1982; Vlierberghe, 2014).

modular al tetraedro en *la Galería de Arte de la Universidad de Yale*, en la segunda propuesta de diseño en con colaboración con Anne Tyng, Kahn plantea la *City Tower* para ser construida en la ciudad de Filadelfia, pensada para trabajar como una estructura espacial tomando como base el hexágono y el triángulo, proyecto que al final no sería construido ante la complejidad que presentaba su construcción por el uso de hormigón.

Es precisamente en el mundo de la posguerra, en el año de 1953, donde diseñó su primer encargo de gran envergadura, su primera gran obra de arte, *la Galería de Arte de la Universidad de Yale*, que se planteó como una ampliación al Museo ya existente de la Universidad, la cual abundó con innovaciones técnicas, como los pisos removibles para acceder a los sistemas mecánicos o la apariencia brutalista del edificio en el contexto neogótico de Yale, donde se buscaba ofrecer el máximo de flexibilidad capaz de adaptarse a cualquier exposición (Elleda & Katan, 1962-1963; Giurgola, 1982; McQuade, 1957).

El edificio de la Galería de Arte de la Universidad de Yale, fue proyectado para exposiciones de arte y arquitectura, por lo que buscaba evitar las divisiones interiores, y como se observa en las plantas, planteando utilizar paneles móviles para subdividir los espacios, adaptándose a cualquier exposición que se presentara. Cuenta con un núcleo interior para servicio de instalaciones, escaleras y ascensores.

Ilustración 245 Detalle de forjados y encofrados de hormigón armado de la Galería de Arte de la Universidad de Yale (Jiménez & Cantero, 2013; Prentice, 1952e).

Con esta solución de forjados, logró por medio del uso de un módulo a base de tetraedros, huecos formados por medio de costillas de hormigón armado, con esta solución, Kahn logra eliminar los cielorrasos suspendidos para esconder las tuberías de las instalaciones de una manera sencilla, principalmente eléctricas. El material de hormigón no fue cubierto por ningún tipo de acabado manteniendo la apariencia brutalista del edificio existente.

Ilustración 246 Lobby de la Galería de arte de la Universidad de Yale, 1953 (Vlierberghe, 2014).

El reticulado triangular formado en los forjados por el uso del tetraedro como forma geométrica base, fue motivado por las teorías de Fuller en su Octet Truss aplicado en el Ford Rotunda Dome, e inclusive por las ideas de Mies Van der Rohe. El reticulado en conjunto con los armados de las nervaduras de hormigón darían el soporte de las cargas muertas y vivas que se generan en las grandes luces de los forjados.

Ilustración 247 Sección, planta estructural y nodos de unión de la City Tower (Laverty, 2015).

Ilustración 248 Retícula de la Galería de arte de la Universidad de Yale (Vlierberghe, 2014).

El armado de las nervaduras hacen que el forjado trabaje como una solución espacial y a la vez en forma tri-direccional en la transmisión de las cargas a las columnas de hormigón armado en los 5 niveles que componen la ampliación de la galería, y donde sería empleado el mismo sistema constructivo reticular de hormigón (Elleda & Katan, 1962-1963; McQuade, 1957; Prentice, 1952e).

Ilustración 249 Maqueta (Laverty, 2015; MetropaSchool, 2013).

El otro proyecto donde Louis I. Kahn aplica una solución estructural reticular, y cuyo trabajo estructural sería tridimensionalmente, y aunque no haya sido construido el proyecto por la complejidad de su solución, principalmente por la complicación que presentaban los nodos de unión, fue la Philadelphia City Tower (1952-1957). La belleza del diseño tomando como base el hexágono en planta y el tetraedro en volumen, hacen recordar a las estructuras planteadas y diseñadas por Fuller. Khan utiliza su experiencia en la propuesta de la ampliación de la Galería de Arte y algunos otros proyectos tempranos para dar un origen a su propuesta, proyectos que contenían una propuesta que empleaban marcos y un orden geométrico.

La estructura espacial diseñada y pensada por Kahn en la City Tower, estaba planteada para construirse con elementos prefabricados, que inclusive podrían ser huecos, donde las articulaciones eran sobredimensionadas para contener empujes de otros elementos como serían los núcleos de servicios, estos nodos también serían diseñados con un núcleo de retícula tetraédrica aplicando un sistema constructivo similar al aplicado en la ampliación de la Galería de Arte de la Universidad de Yale, para intentar contener los esfuerzos generados en el nodo.

En ambos proyectos Kahn logra proponer un sistema reticular, empleando el hormigón como solución de sus propuestas, la diferencia radica en la capacidad de transportar los esfuerzos al ser sistemas estructurales diferentes, en la Galería de Arte logra construir el proyecto a diferencia de la City Tower, donde como ya se ha mencionado, la complejidad de la propuesta empleando el hormigón lo hacía imposible de construir en esa época ante la posibilidad de su colapso. “El proyecto de City Tower es importante como parte del desarrollo más amplio de los marcos espaciales y la noción de crecimiento, estos marcos incitan a arquitectos de los años 1950’s y 1960’s a desarrollar estructuras modulares de proporciones utópicas” (Albani, 2013). Posteriormente con el estudio de trabajos y la influencia de investigadores de la época al trabajo de Kahn (como lo fue R. Le Ricolais, con quien tuvo una relación de trabajo cercana), intentaría dar solución a sus proyectos con los materiales que más le gustaba. Sus propuestas

dan una muestra a que el empleo de hormigón no está descalificado como opción para dar solución a estructuras reticulares.

Pier Luigi Nervi (1891-1979).

Pier Luigi Nervi nació en Sondrio, Italia en el año de 1891 y murió en Roma en el año de 1979, siguió una línea de investigación desarrollada inicialmente por pioneros como el ingeniero francés Francois Hennebique (1842-1921) y posteriormente, por el ingeniero suizo Robert Maillart (1872-1940). Al igual que sus predecesores, Nervi fue a la vez tanto diseñador como constructor, donde mezcló el arte y la ciencia en la construcción empleando el hormigón armado, convirtiendo este material en el vehículo para la realización de su obra. Por otro lado, Nervi fue un calculista excepcional, a tal punto que tuvo que adiestrar a otros constructores para que pudieran ayudarle a realizar sus complicados proyectos que diseñaba, además de que como pocos constructores era consciente de la importancia de los costos (Chao, 2005b; M. A. Chiorino).

“Nervi no sólo construyó edificios. En su fase de inventor, perfecciono el ferrocemento, un material que le permitió trascender la belleza estructural, y que se puede encontrar en algunas de las construcciones de la antigua Roma, donde aún asombran a los visitantes. Con el ferrocemento pudo crear también botes y veleros, negocio que le dejó buenos réditos” (Chao, 2005b).

Durante la Segunda Guerra Mundial, los hangares de Orvieto, Torre de Lago y Orbetello fueron construidos entre los años de 1935 y 1940, con medidas aproximadas de 100 x 36 x 12.50 m, proyecto que consolidaría la fama ya adquirida, y le daría un vuelo a su talento ya demostrado al emplear materiales como el hormigón y la estructura metálica. Los hangares ya terminados resultaron impresionantes con sus arcos parabólicos cruzados y su techo laminar de hormigón. Las bóvedas de algunas de estas instalaciones estaban construidas mediante una retícula ligera de nervios de hormigón armado cruzados en diagonal formando una retícula tipo Lamella, que ayudaban a salvar una impresionante luz. En el caso de los hangares resueltos con una estructura metálica, empleó en su mayoría arcos tipo armaduras de retículas triangulares formadas por sus diagonales unidas a las cuerdas de perfiles, los arcos estaban

unidos por correas también metálicas para poder soportar y sostener la cubierta de hormigón. Es importante mencionar que Nervi logra el aligeramiento de la estructura por medio de la prefabricación de los elementos de la estructura reticular (M. A. Chiorino).

Los edificios daban la impresión de una apariencia contradictoria, tanto de fuerza como de ligereza, y a la vez, sin vigas de acero o columnas interiores que interrumpieran el paso de luz y sombra, logrando así solventar el proyecto planteado para las necesidades de la Segunda Guerra Mundial. Lamentablemente hacia fines de la Segunda Guerra Mundial, bombardearon las estructuras y las convirtieron en ruinas. (Chao, 2005b; M. A. Chiorino; Paolo Desideri et al., 1982).

También en los años 1950's, Nervi realizó una variedad de estudios y proyectos no ejecutados, sobresaliendo la propuesta que realizó para el proyecto de *The Center of New Industries and Technologies (C.N.I.T.)* en París en el año de 1955, el proyecto final fue realizado por arquitectos Robert Edouard Camelot, Jean de Mailly, Bernard Zehrufuss, con la asesoría del ingeniero estructural del cascaras de hormigón Nicolas Esquillan, siendo Nervi un colaborador del proyecto.

Ilustración 250 Proyecto construido C.N.I.T.

Ilustración 251 Alzado y planta de propuesta de Nervi para la C.N.I.T. (B. London, 2014).

La propuesta que realizó Nervi para la realización de la estructura del C.N.I.T., es de una sencillez notable por medio de la generación de una retícula triangular en 3 direcciones, utilizando elementos prefabricados de hormigón armado como parte de la solución de la forma final de un paraboloides hiperbólico, estilo que también gustaba a Eduardo Catalano y que proponía en los Estados Unidos. Nervi propone dar solución a este proyecto con el estilo del sistema constructivo que lo llevaría a la fama, empleando sistemas prefabricados de hormigón intentando reducir los costos de construcción sin afectar la forma propuesta (Paolo Desideri et al., 1982).

Ilustración 252 Propuesta de solución estructural de Nervi para el C.N.I.T. (Paolo Desideri et al., 1982).

El trabajo de Pier Luigi Nervi se amplía más allá de los años 1950's, pero su trabajo se consolida en estos años con la realización de proyectos y propuestas que le daría el reconocimiento mundial, además de proporcionar soluciones a las

Ilustración 253 Ilustración 228 Palazzetto dello Sport, Roma, 1957 (M. A. Chiorino; Vitellozzi, 1958).

estructuras ligeras laminares y reticulares por medio de la aplicación metodologías innovadoras como la utilización de otros materiales como el ferrocemento; además de técnicas constructivas como la pre-compresión y el pre-tensado; y finalmente complementado y optimizando sus procesos empleados en la construcción, con técnicas como lo fue la prefabricación de materiales y de elementos estructurales.

En la búsqueda de la prefabricación, Nervi desarrolló en los años 1950's tres tipos de elementos prefabricados que aparecen en varias de sus formas propuestas (Prentice, 1953d):

- Vigas corrugadas prefabricadas (cubierta de la exposición de Turín).
- Techos de cofre prefabricadas. Fueron usadas para dar forma a los típicos techos acanalados de muchos de sus trabajos (cubierta del restaurante de Nervi, dance Hall).
- Formas de ferro-cemento, delgadas, resistentes y revisables. Una invención de Nervi.

Posteriormente para los juegos olímpicos de Roma en el año 1960, Nervi diseñó dos palacios de deportes, the Palazzetto dello Sport y the Palazzo dello Sport. El denominado Palazzetto dello Sport de Roma, construido entre los años de 1956 y 1957 para un aforo de entre 4,000 y 5,000 espectadores, es una de sus obras más conocidas y probablemente una de las más reconocidas a nivel mundial, se trata de un edificio de planta circular de 50 m de diámetro en la sala, rodeado por 36

caballetes en forma de Y, dispuestos radialmente e inclinados según la tangente a la curva, coronado por una cúpula construida con 1620 elementos prefabricados romboidales de hormigón armado, formando una retícula y de tableros también prefabricados.

Con la intención de minimizar los costos del encofrado y apoyar el sistema constructivo en el Palazzetto dello Sport, Nervi utiliza una serie de invenciones auténticas, como el ya mencionado ferrocemento, la prefabricación estructural y una serie de soluciones técnicas originales (C. Chiorino; Paolo Desideri et al., 1982; Vitellozzi & Nervi, 1958). El Palazzetto dello Sport en conjunto con el Palacio de los Deportes de la ciudad de México, se convirtieron en modelos de la arquitectura deportiva del siglo XX.

Ilustración 254 Palazzetto dello Sport, Roma, 1957 (C. Chiorino; Vitellozzi & Nervi, 1958).

2.2.3. La búsqueda de la forma como inicio de una ideología moderna.

A mediados del siglo XX, con el desarrollo de las estructuras reticulares, el empleo de nuevas técnicas constructivas influenciadas con la utilización de nuevos materiales, inicia también la búsqueda de una nueva ideología de la forma por parte de arquitectos e ingenieros, influenciada por el diseño de estructuras ligeras industrializadas y muchas veces estandarizadas.

2.2.3.1. The Skylon.

The Skylon es una de las obras que más reconocimiento le dio al ingeniero Félix Samuely, diseñado por los arquitectos Philip Powell e Hidalgo Moya, fue

Ilustración 255 Proceso de montaje (Bloc, 1952; RIBA).

Ilustración 256 The Skylon (RIBA).

En general, The Skylon tenía la forma de doble cuerpo cónico unidos en sus bases con una sección que consistía en 12 caras, formando así un volumen poliédrico, donde el proyecto principal fue formado por una piel que luce tensa a base de louvres de aluminio soportados por un esqueleto prefabricado de acero (RIBA). Técnica que desde un inicio Samuely planteaba al hacer trabajar las estructuras como piel.

La estructura principal esta soportada en una especie de cuna, fabricada de cables pretensados de alta resistencia, apoyados en 3 vigas de soporte fabricados de perfiles de acero trabajando a compresión, las vigas de soporte eran fabricadas con perfiles de acero tipo ángulo y placas de acero,

Ilustración 257 Detalles constructivos y estructurales The Skylon (Bloc, 1952; RIBA).

formando una sección final triangular. Los postes descansan sobre una base de fabricación especial, donde se colocó un gato hidráulico como base en su parte inferior, cada gato es capaz de orientar la viga de soporte de manera que fuera apto de asegurar la estabilidad de la estructura del The Skylon, las bases fueron asentados en pilotes (Bloc, 1952; Prentice, 1954c), este principio de cables pretensados para el soporte de una estructura se convertiría en el principio de soporte de cargas de las torres de televisión y también se convertiría en un precedente de las estructuras tensegrity.

Ilustración 258 Base de poste (Prentice, 1954c).

Diferentes tipos de unión o nodos fueron diseñados para resolver los diferentes puntos de intersección de los elementos estructurales, tomando en cuenta el tipo de esfuerzos que van a transmitir cada uno, la unión de la base con las vigas

de soporte será fabricado con placas de acero, formando un nodo de unión tipo rodilla capaz de adaptarse a la inclinación que la estructura requiera, soportando esfuerzos principalmente a compresión y cortante; el nodo de unión tipo araña resuelve la unión de los cables tensados que soportarán la estructura principal de forma poliédrica, logrando transmitir las cargas a tracción a través de los diferentes cables, este nodo proporcionara la estabilidad y verticalidad de la estructura haciendo parecer que esta flota sobre el suelo.

Ilustración 259 Interior The Skylon (Prieto, 2014).

La geometría de la forma final generada para el proyecto, será desarrollada en base a una retícula ortogonal para la estructura principal y una retícula secundaria en dos direcciones a base de tensores funcionamiento como arriostramiento de la estructura principal, dando como resultado una retícula en 4 direcciones para conferir la estabilidad que la geometría de la estructura necesita, llegando a formar una retícula final basada en la celosía Long.

Ilustración 260 Proceso de construcción, The Skylon (Andreasson, 2013; Group, 2015; Kolher, 2010; Prieto, 2014).

2.2.3.2. Félix James Samuely (1902-1959), el desarrollo del pretensado en estructuras metálicas).

Félix Samuely fue un ingeniero estructural nacido en Viena, Austria en el año de 1902, emigraría a Gran Bretaña en el año de 1933, fundando posteriormente la firma de ingenieros F. J. Samuely and Partners Ltd. en el año de 1956, donde Frank Newby se convirtió en socio en el año de 1959, ante la muerte prematura de F. Samuely el mismo año (Limited). Samuely contribuyó en Gran Bretaña en el desarrollo de la forma y la técnica aplicada en el desarrollo de las estructuras, y en algunos casos empleando la retícula triangular como solución final en sus propuestas.

Al término de la Segunda Guerra Mundial, ante la carencia de diseños y proyectos estructurales innovadores que hagan frente a la escasez de materiales que sufría la época para el desarrollo de formas nuevas y proyectos que se adapten a las necesidades, desarrollo que fue alentado en Gran Bretaña por los ingenieros que trabajaban para los arquitectos del periodo, siendo Félix Samuely

Ilustración 261 The Skylon (Limited).

una de las figuras cuyos trabajos influyen a los posteriores, ya que se convirtió en uno de los ingenieros más innovadores de la época.

En el mundo de la posguerra, ante la necesidad de la reconstrucción de las ciudades y la construcción de escuelas, casas y fábricas entre otros proyectos, su trabajo fue determinado por estas necesidades urgentes, limitadas por la escasez de materiales, mano de obra calificada como ya se ha mencionado y la gran deuda extranjera adquirida por Gran Bretaña para solventar los gastos de la guerra, logrando emplear de manera eficiente los materiales y sistemas constructivos como vigas de acero, hormigón pretensado, placas dobladas de acero y hormigón armado, así como encontrar formas geométricas más eficientes que permitieran economizar los recursos existentes.

Después de la Segunda Guerra Mundial y con una gran reputación, Félix Samuely contribuyó en la elaboración de un programa de construcción para escuelas y colegios entre los años de 1945 y 1952, además de desarrollar técnicas que economizaran el uso de materiales como lo fuera el uso de hormigón premezclado. Con su participación en el Festival Británico del año 1951 y en el diseño para The Skylon fue aún más evidente la manifestación de sus talentos.

En sus publicaciones en los años 1950's, Samuely afirmaba que las grandes bóvedas góticas fueron construcciones trabajando como estructuras

espaciales, absorbiendo los empujes en 3 dimensiones que se convertirían en las edificaciones del mañana. En estos años Samuely creía que estaba por empezar una gran revolución, por lo tanto mencionaba que en cientos de años en el futuro personas mirarían atrás a los años 1950's, como la época cuando la construcción cambió del plano al espacio y vio el nacimiento de una nueva arquitectura (Prentice, 1953a, 1954e; Samuely, 1953). Visión que fue acertada ante este planteamiento, ya que en la actualidad, investigadores aseguran que la época dorada de las estructuras espaciales se desarrolla a mediados del siglo XX sin la necesidad de que pasaran 100 años, por lo que esta afirmación de Samuely y sus trabajos lo colocan como uno de los grandes ingenieros visionarios que contribuyen en la consolidación de las propuestas reticulares ligeras.

Samuely clasificaba las estructuras espaciales en dos tipos: marcos espaciales y estructuras de piel tensadas, donde ambas pueden ser desarrolladas con vigas de estrella (vigas que tienen al menos 3 soportes en el espacio) (Samuely, 1953).

Samuely mencionó y resumió el comportamiento de las envolventes espaciales mencionando que para cubrir grandes espacios era necesario emplear construcciones actuando como piel. Toda una serie de nuevas estructuras que se construyeron y diseñaron a mediados del siglo XX muestran una aproximación a lo que es llamado acción piel, siendo calculada para propagar los efectos de las cargas lateralmente en lugar de acarrear la carga a las trabes, armaduras o arcos, descansando en 2 soportes. Las más familiares a este tipo de comportamiento son las bóvedas con retícula tipo Lamella que fueron usados en muchos supermercados, los más recónditos son los hangares para aviones (Prentice, 1954e).

Considerando la revolución que inicia Samuely en Gran Bretaña y sus nuevas dimensiones, menciona: "La esencia del marco espacial es que en lugar de ser descubierto para transferir cargas a miembros verticales en un plano simple, tales como poste y viga o construcción en armadura, está diseñado también para propagar las cargas lateralmente, por lo que las cargas son acarreadas

simultáneamente en 3 o más soportes usualmente por una multiplicidad de unidades estructurales” (Prentice, 1954e). Lo que en resumen nos menciona que para optimizar la transmisión de los esfuerzos y cargas era necesario aumentar una dimensión en la construcción de las estructuras.

Ante la problemática que se presentaba a mediados del siglo XX, con los estudios y proyectos realizados por Samuely, el mismo concluye que la filosofía de la ingeniería estructural abarca 3 diferentes temas, temas que forman parte importante desde su punto de vista en la construcción de las edificaciones para optimizar los proyectos (Samuely, 1957):

- Ingeniería estructural como tal, con ideas absolutas con los cuales los ingenieros estructurales trataran de vivir también.
- Ingeniería estructural como parte del proceso de construcción. Los cuales jugaran un papel importante o menos importante dependiendo del tipo de proyecto.
- Un tema más personal, negociar con la posición del ingeniero estructural en el proceso de construcción y su colaboración con otros colaboradores de la industria, principalmente arquitectos.

Ante estos temas mencionados el primer criterio para una estructura, es que no debe de haber desperdicio, el ingeniero estructural es el guardián de la economía en una estructura en conjunto con el arquitecto. En opinión de Samuely un buen ingeniero no solo debe de entender la estructura y sus posibilidades, también el efecto mutuo de la estructura y otros elementos del edificio, esto incluye principalmente la función del edificio, por lo que el ingeniero estructural, por supuesto, no solo tiene que pensar en formas de resistencia y economía en la estructura moderna, tiene que resolver un gran número de tareas además de estas (Samuely, 1957).

Durante sus investigaciones, Samuely va a distinguirse por varias técnicas y tecnologías que aplica y desarrolla, por lo que es importante tomar en cuenta los métodos de colocación de soldadura y el empleo del acero pretensado como dos técnicas de optimización de los recursos disponibles en la construcción de estructuras ligeras.

La aplicación de soldadura en estructuras.

Aunque la tecnología de aplicación de soldadura en estructuras data del siglo XIX, y se consolida en los años 1930's, principalmente aplicada para estructuras de fábricas, es importante mencionar la importancia que tuvo Félix Samuely en la introducción de la soldadura en la arquitectura e ingeniería de construcción.

La importancia de las contribuciones de Samuely al desarrollo de la soldadura, fue el protagonismo de los edificios que trabajó en el uso integral de la soldadura dentro de las estructuras y las nuevas formas de construcción introducidas en la época (Yeomans, 2003). La importancia de la soldadura influye en el desarrollo de las estructuras reticulares que emplean tubulares como insumo para la fabricación de las barras, así como la invención de los nodos prefabricados que optimizan la unión al facilitar el armado de las estructuras en varias direcciones.

El acero pretensado.

Otro ejemplo de aplicación de nuevas técnicas en la construcción de estructuras por Samuely, es el empleo del acero pretensado. “El techo de los talleres en la escuela Thomas Linacre tenía el primer ejemplo de acero pretensado registrado en Gran Bretaña. Aunque Samuely había participado en un ensayo en acero pretensado dos años antes, cuando diseñó lo que pretendía ser un diseño del techo estándar para Sommerfelds, una empresa fabricante de acero. Este techo consistía en pirámides de chapas metálicas cargadas por marcos de ángulos pero con tubos entre sus vértices para formar el cordón superior, estas pirámides fueron pretensadas con cables dentro de los tubos de acero, este debía ser armado en el suelo y montado en su posición. Pero aunque se construyó un prototipo no fue comercializado” (Yeomans, 2003).

The Skylon se convertiría posteriormente en un ejemplo de aplicación del acero pretensado, para la generación de una nueva forma aplicada para la construcción de una estructura distinta a las construidas con anterioridad.

Ilustración 262 De la Warr Pavilion Bexhill-on-Sea (Limited).

Ilustración 263 Rampa para la alberca de pingüinos (Timelines, 2015).

Otros proyectos.

De la Warr Pavilion Bexhill-on-Sea, su edificio original data de 1935, este famoso y elegante edificio es efectivamente uno de los más grandes trabajos realizados por Samuely, en este proyecto, utilizó la primera estructura de acero soldada significativa en el Reino Unido, donde la esbeltez resultante de los balcones en voladizo y escaleras se añaden como elementos excitantes del edificio. El empleo de perfiles para solución de la estructura en combinación de la soldadura, disminuye considerablemente los tiempos de construcción (Limited).

Otro proyecto fueron las rampas en espiral para la alberca de pingüinos ubicadas en el zoológico de Londres construidas en el año de 1935 por Ove Arup, trabajada en conjunto con Félix Samuely, el proyecto se convirtió en uno de los ejemplos tempranos del empleo de hormigón reforzado en Gran Bretaña, convirtiéndose en otra técnica de empleo de materiales que gustó a Samuely como propuesta de sus proyectos, y que posteriormente influyen en el desarrollo de estructuras ligeras al disminuir las secciones que requieren las estructuras de hormigón sin refuerzos de acero.

Félix Samuely también contribuyó al desarrollo de nuevas formas geométricas, aplicando tecnologías innovadoras y nuevos materiales, además del desarrollo de nuevos sistemas constructivos y estructurales, logrando la optimización de los procesos de construcción de los

proyectos, e influenciar en el desarrollo y evolución de las estructuras ligeras posteriores, entre ellas las estructuras reticulares, mejorando considerablemente la transmisión y resistencia a los esfuerzos que se generan una vez construidas, hasta lograr que la forma no fuera una problemática a la solución de los proyectos.

Por último, el conocimiento de Samuely con respecto a las estructuras espaciales reticulares queda demostrado con su forma de pensar y la visión sobre el futuro de estas estructuras, Samuely escribe y dice: “Yo creo que estamos en la víspera de una gran revolución que durará cientos de años. Por lo tanto dentro de cien de años la gente mirará atrás en su tiempo, como cuando la construcción cambió del plano al espacio y vio el nacimiento de una nueva arquitectura. Aquí está el futuro, entonces, así como luce hoy, la estructura será diseñada en más dimensiones que ahora, será el llamado a llevar a cabo más funciones simultáneas que ahora; servirá a una gran variedad de enfoques en el diseño arquitectónico. Tendrá que resistir grandes fuerzas destructivas, más que ahora; se necesitará y obtendrá muchos nuevos materiales, acoplados con los nuevos métodos de construcción, en consecuencia implicará análisis más difíciles” (Prentice, 1954e).

2.2.3.3. Georges Robert Le Ricolais (1894-1977), el desarrollo de la estructura ligera y la influencia de la geometría como solución de la forma.

Robert Le Ricolais nació en La Roche-sur-Yon, Francia en el año de 1894, estudió y trabajó en su país natal hasta 1951, donde en esa fecha comenzó su carrera académica en los Estados Unidos tomando a su cargo talleres de estructuras en diversas Universidades, siendo la Universidad de Pennsylvania donde desarrollaría sus principales trabajos de investigación desde el año de 1954 hasta el año de 1976, construyendo varios modelos de acero, entre ellos diseñó propuestas de retículas que posteriormente servirían para el desarrollo de estructuras reticulares ligeras (Buildings, 2015; Le Ricolais, 1997a).

Ilustración 264 Venera y Radiolarios (Le Ricolais, 1997a).

Le Ricolais atrajo la atención de su natal Francia con la publicación del artículo *Les Toles Composées et leurs applications aux constructions métalliques légères* (1935) teniendo como traducción, *Los palastros compuestos y sus aplicaciones en las construcciones metálicas ligeras*, donde presenta a la industria de la construcción el concepto de estructuras ligeras de revestimiento resistente similares a los fuselajes (Le Ricolais, 1997a). Este planteamiento mostraría una base en los futuros esbozos de estructuras ligeras ya aplicadas en otras industrias y que en la historia de la industria de la construcción han servido para su desarrollo.

En su búsqueda de la forma y la estructura perfecta, Le Ricolais consideró a las formas naturales, al ser mecánicamente más eficaces que las construidas por los humanos, centrando así sus estudios en estas estructuras naturales como lo eran la venera y los radiolarios, donde hace hincapié en sus estudios entre las zonas de esfuerzos trabajando a tracción y a compresión, así como las ventajas de las redes espaciales en tres direcciones sobre las redes ortogonales bidireccionales. Posteriormente estudió la estructura y forma de los cristales, en particular la especialidad de poliedros clasificándolos por su grado de isotropismo. Le Ricolais concluye con estos estudios dos hipótesis que expresan que la forma estructural está en gran medida influenciada por la relación entre las formas y sus imágenes reflejadas, pero también por la distribución del

Ilustración 265 Imagen de huesos vista desde un microscopio (Le Ricolais, 1997a).

material en el espacio (Le Ricolais, 1997a). Le Ricolais gusta por experimentar y estudiar con otras formas naturales como películas de jabón y burbujas, arañas y sus telas, cascadas de huevo, minerales, huesos y retículas naturales.

Sus trabajos y propuestas comienzan con su llegada a Estados Unidos a inicios de los años 1950's y posteriormente desarrollados en los años siguientes hasta su muerte en el año de 1977. El desarrollo y entendimiento de las estructuras de Le Ricolais favorece el análisis de los sistemas reticulares empleados, para hacer más eficiente el uso de materiales y sistemas estructurales en la construcción de los proyectos, así como el desarrollo de la forma y geometría empleada por las estructuras propuestas por el mismo y posteriormente por otros diseñadores. La ligereza será la característica principal en las investigaciones de Robert Le Ricolais basada en el diseño de la retícula, el empleo del módulo geométrico y la experimentación con estructuras tensadas.

Estas investigaciones buscaron comprender la relación entre las formas, experimentando con lo que Le Ricolais denominó *las interminables reflexiones y comparaciones de soluciones opuestas a un proyecto*, llegando a descubrir que cuando la estructura se llega a desarrollar en más direcciones y cuanto mayor sea el espacio que ocupe menos será la deformación (Le Ricolais, 1997a). Estudios y reflexiones que daría como resultado experimentos donde la ligereza no es un impedimento para dar propuestas geométricas innovadoras.

Ilustración 267 Modelos reticulares de acero:
Hexacore, Trihex y Starhex (Fracari, 2002).

Ilustración 266 Domo Hexacore y Domo Starhex (Le Ricolais, 1997a;
Prudence, 2014).

Su frase “El arte de la estructura es donde colocar los huecos” (Le Ricolais, 1997a), es pensada con una lógica estructural ante las formas resistentes realizadas por la naturaleza, pensada ante la imagen de los huesos humanos vistas desde un microscopio. Frase que daría a Le Ricolais el reconocimiento de su pensamiento complejo y de su trabajo innovador de investigación. La imagen observada en microscopio de los huesos humanos, muestra el entramado de la retícula natural en diferentes direcciones, factor que da estabilidad a una de las estructuras mejor evolucionadas por la naturaleza, y dando la pauta a Le Ricolais a intentar construir con huecos, proveyendo de mayor resistencia y estabilidad a una estructura, sin aumentar su peso, por lo que otorga gran ligereza a un estructuras capaces de soportar varias veces su peso propio.

Ilustración 268 Bodega en África, Robert Le
Ricolais (Prentice, 1953e).

Las investigaciones y experimentos de Le Ricolais, que realizó en conjunto con sus estudiantes, desarrollan estructuras reticulares por medio de los diversos estudios realizados principalmente en la generación de formas geométricas resistentes y estructuras internas de gran ligereza, intentando copiar las fabricadas en la naturaleza como solución de sus propuestas, por lo que ayudarían al desarrollo de nuevas formas geométricas y ampliar las combinaciones estructurales con soluciones óptimas, y que emplean como solución a sistemas de estructuras reticulares capaces de evolucionar con las tecnologías que también se desarrollaban en la época, y que posteriormente tuvieron la capacidad de adaptarse a las futuras propuestas. Por lo tanto en el desarrollo actual de las nuevas formas libres e inclusive en las geometrías emergentes que empiezan a surgir en el siglo XXI, la solución para estas propuestas formales, podría encontrarse en la adaptación que se buscaba en los estudios realizados por Le Ricolais (Le Ricolais, 1961-1962).

Ilustración 269 Trabajos de estudiantes de la Universidad de Pennsylvania asesorados por Robert Le Ricolais (Le Ricolais, 1960; Prudence, 2014).

2.2.3.4. Eduardo Fernando Catalano (1917-2010), el desarrollo de la geometría y retícula como solución de las estructuras laminares.

Eduardo Catalano arquitecto de profesión, nació en la ciudad de Buenos Aires, Argentina en el año de 1917 y murió en el año de 2010, llegó a Estados Unidos con becas para la Universidad de Pennsylvania y de Harvard, siendo estudiante de Walter Gropius en esta misma, mostrando interés en las formas geométricas avanzadas (Glancey, 2010). Robert Le Ricolais consideraría a Eduardo Catalano como uno de los grandes representantes de la arquitectura de los Estados Unidos en conjunto con M. Novicki y R. B. Fuller (Le Ricolais, 1953).

Catalano también mostró interés por los sistemas prefabricados, al participar en varias competiciones para dar soluciones a sistemas de prefabricación de casas empleando un enfoque modular, que ya aplicaba con anterioridad Gropius. Enfoque modular que en la segunda mitad del siglo XX continuarían adoptando diversos investigadores y constructores, ante las diversas facilidades y ventajas que presentaba la modulación de las propuestas, al optimizar los procesos de diseño y construcción.

Ilustración 270 Superficies alabeadas del libro
Structures of Warped Surfaces, Eduardo Catalano
(Catalano, 2011).

Ilustración 271 Maqueta de un paraboloides hiperbólico en la biblioteca de
la NC State's School of Design (Morris, 2010).

En los años 1950's y con las tendencias mundiales que presentaba al terminar la Segunda Guerra Mundial, y ante la búsqueda de nuevas tecnologías, de formas aplicadas a edificaciones, de metodologías para cubrir espacios, envolventes y estructuras que satisfagan las grandes luces de las nuevas estructuras de la época, Eduardo Catalano (desde que estaba en la escuela de diseño de la North Carolina State College) encuentra en los paraboloides hiperbólicos (donde fabricó maquetas desde la Primera Guerra Mundial) una solución ante los desafíos que se presentaban en la segunda mitad del siglo XX, convirtiéndose en uno de los grandes investigadores de las estructuras laminares de hormigón y de estructuras ligeras, adaptando en algunos casos las retículas como solución constructiva a los paraboloides hiperbólicos que tanto le gustaban.

Eduardo Catalano mencionó en sus teorías que los paraboloides hiperbólicos eran las formas más eficientes de una estructura funcionando como

Ilustración 272 Proyecto Santa María y Proyecto La Pinta (Bloc, 1953b).

envolvente, ya que todas las tensiones son iguales en ella, debido a que la doble curvatura la hace más rígida (Prentice, 1955b; Sprague, 2010).

“Catalano desarrollaría un sistema donde las nuevas formas podrían ser generadas simplemente modificando los parámetros de diseño. Su libro *Structures of Warped Surfaces* exploró varias combinaciones de formas de paraboloides hiperbólicos con una gran variedad de soportes, buscando nuevas formas para proporcionar una superficie envolvente” (Sprague, 2010).

Ilustración 273 Paraboloide hiperbólico reticular y casa de Eduardo Catalano (Prentice, 1955b).

Catalano en conjunto con Robert Le Ricolais, realizarían en la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Raleigh ejercicios con sus estudiantes, donde algunas de las propuestas de soluciones son diseños innovadores para la época, al combinar las superficies alabeadas para la generación de formas complejas que den solución a diversos proyectos, haciéndolos trabajar como estructuras espaciales laminares y que servirían de

ejemplo para desarrollar las bases estructurales de una organización tridimensional de las estructuras, y ante la demanda social de espacios cubiertos, les incitaba a intensificar la búsqueda de aquellas formas y soluciones al problema, ya que durante ese periodo la mayoría de los edificios eran proyectados en marcos y estructuras de tres dimensiones ante el gran desarrollo que surgía a mitad del siglo XX en la aplicación de estos sistemas estructurales (Bloc, 1953b).

Ante los factores que se empezaban a presentar en el diseño y construcción de proyectos, y ante las necesidades latentes en el mundo durante este periodo de tiempo, las investigaciones y aplicaciones de Catalano empezaron a plantear las bases del desarrollo de estructuras laminares propuestas en hormigón de formas complejas, en algunos casos apoyándose en el empleo de retículas que pudieran dar solución a los proyectos que se empezaban a plantear con la utilización de las geométricas avanzadas que Catalano proponía, inclusive empleando otros materiales como el metal y la madera, lo que plantea las bases del futuro diseño paramétrico digital con sus estudios, además de la generación de estructuras de forma libre con la combinación de sus superficies alabeadas capaces de ser resueltas por medio de una triangulación en su estructura y combinando la aplicación las tecnologías actuales para su solución, sus propuestas reticulares proyectan de manera clara el precedente de una forma libre empleando una doble curvatura para la generación de las superficies. El conocimiento de los materiales como lo fue el hormigón, pero también su experimentación con otros materiales como el aluminio y la madera chapada, así como las tecnologías y buscando el apoyo con otros investigadores y constructores, plantearía ideas innovadoras que servirían como influencia para futuros diseñadores y constructores. Ante la influencia en el desarrollo de la forma, Catalano debe ser considerado como una autoridad en el desarrollo y evolución de las geometrías complejas de las estructuras reticulares.

Ilustración 274 Maqueta de unas estructuras reticulares con base en un paraboloide hiperbólico (Bloc, 1953b; Prentice, 1953e).

2.2.4. Proyectos y edificaciones reticulares triangulares, 1946-1960.

En este periodo de tiempo se puede resumir, en los avances e investigaciones en estructuras espaciales reticulares, donde también empiezan a confirmar las ventajas de su empleo en edificaciones de diferentes usos, empleando principalmente como material de construcción al acero, así como el surgimiento de nuevos materiales ante la carencia del acero como la madera y el aluminio, en conjunto con el desarrollo de tecnologías innovadoras que sirvieron para el perfeccionamiento de los proyectos de grandes luces de usos y formas diversas, estructuras en cantiléver utilizados principalmente para hangares (resaltan por su ligereza y grandes claros), domos y bóvedas cañón utilizadas como envolventes de fábricas y edificaciones para espectáculos, así como la confirmación del inicio de las propuestas de grandes estructuras (iniciada con la propuesta de la City Tower) con los diseños realizados por Isozaki y Friedman, para lograr finalmente convertir a las estructuras reticulares en la propuesta más óptima en la creciente demanda de grandes edificaciones libres de apoyos intermedios, confirmando su futuro prometedor en el Simposio donde se reunieron varios de los mejores representantes en el diseño y construcción de estructuras.

Además ante la creciente necesidad de construcción de edificaciones, las estructuras reticulares se consolidan a mediados del siglo XX, como una solución económica, ligera y de fácil montaje, convirtiéndose en edificaciones que evolucionarían en las estructuras de grandes luces en años subsecuentes, así como la posterior aplicación de la retícula triangular en edificios de altura. Y finalmente con el surgimiento del término *Diagrid*, que a finales del siglo XX se afianzaría para describir principalmente a edificios de altura carente de apoyos verticales para transmitir las cargas a los cimientos, marcando y consolidando así a este periodo como la época dorada del desarrollo de las estructuras reticulares.

Ilustración 275 Resumen de principales arquitectos, ingenieros e inventores, 1946-1960 (Diseño propio).

-Proyecto. -Diseñadores.	Imagen.	-Lugar. -Año.	-Materiales. -Nodo de unión. -Forma geométrica.	-Tipo de retícula. -No. De capas.	Referencias
- Discovery Dome. - Ralph Tubs.		- Londres, Inglaterra. - 1950	- Aluminio - Nodo especial - Forma de cúpula.	-3 direcciones y retícula tipo esférica. - Una capa.	(Prentice, 1950b) (Bloc, 1950) (Zygmunt Stanislaw Makowski, 1984)
- Fabrica de tractores SOTREQ - Marcelo Milton y Mauricio Romero		-Río de Janeiro, Brasil. - 1950	- Madera laminada. - Nodo especial. - Forma de bóveda cañón.	- Celosía tipo Long - Arcos reticulares	(Prentice, 1950a) (A., 1951)
- Auditorio Nacional de la Ciudad de México. - Fernando Parra, Oscar de Buen y Guillermo Salazar		- Ciudad de México, México. - 1952	- Acero - Nodo especial - Forma de poliedro	- Celosía tipo Pratt - Pórticos espaciales.	(Prentice, 1952b)
- Auditorio Municipal - Richard S. Colley y G. R. Kiewitt		- Corpus Cristi, Estados Unidos. - 1952	- Acero - Nodo especial - Forma de bóveda cañón	- Reticula tipo Lamella	(Prentice, 1954g) (Peissi, 1956)
- Teatro de Manheim. - Mies Van der Rohe.		- Manheim, Alemania. - 1953.	- Acero. - Nodo especial. - Forma poliedro.	- Celosía tipo Pratt. - Armaduras de alma abierta.	(Prentice, 1953b) (Van der Rohe, 1954) (Bloc, 1958b) (P. C. Johnson, 1960)
- Hall del congreso de Chicago - Mies Van der Rohe		- Chicago, Estados Unidos. - 1953	- Acero - Nodo especial	- Celosía tipo Pratt - Armaduras de alma abierta.	(Bloc, 1958c) (Schulze, 1986) (Blaser, 1980)

			- Forma poliedro		
- Hangar para Lockheed Aircraft International - Ingenieros del Puerto de Nueva York		- Nueva York, Estados Unidos. - 1953.	- Acero - Nodo especial - Forma poliedro	- Celosía tipo Howe - Armaduras de alma abierta.	(Prentice, 1954d)
- Ford Rotunda Dome - Richard Buckminster Fuller.		- Michigan, Estados Unidos. - 1953.	- Aluminio - Nodo especial - Forma de cúpula	- Retícula tipo domo geodésico - Dos capas	(Sadao et al., 2011) (Luna)
- Hangares - Dresser-Stacey Co., Joseph Hoover y Leland W. Cook.		- Pittsburg, Estados Unidos. - 1954.	- Acero - Nodo especial - Forma de bóveda cañón.	- Celosía tipo Pratt - Pórticos espaciales tri-articulados.	(Prentice, 1954a)
- Coliseo de Charlotte. - A. G. Odell Jr. & Associates y Severud-Elstad-Krueger.		- Charlotte, Estados Unidos. - 1954.	- Acero. - Nodo especial. - Forma de cúpula.	- Retícula de tipo Schwedler. - Una capa.	(Prentice, 1954h) (Bloc, 1957-1958)
- Hangares. - Erwin-Newman Co.		- Greenville, Estados Unidos. - 1954	- Acero. - Nodo especial. - Forma de poliedro	- Celosía tipo Combinada. - Armaduras de alma abierta	(Prentice, 1954f)

<p>- Anexo de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Michigan.</p> <p>- Theodore Larson..</p>		<p>- Michigan, Estados Unidos.</p> <p>- 1955</p>	<p>- Acero</p> <p>- Nodo Unistrut.</p> <p>- Forma de poliedro.</p>	<p>- Retícula en 4 direcciones.</p> <p>- Dos capas.</p>	<p>(Prentice, 1955a)</p> <p>(L'Université, 1956)</p>
<p>- Piscina Olímpica de Melbourne</p> <p>- Borland, Murphy, Mc Intyre, Arch, W.L. Erwin</p>		<p>- Melbourne, Australia.</p> <p>- 1956</p>	<p>- Acero.</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Forma de bóveda cañón.</p>	<p>- Celosía tipo Howe.</p> <p>- Armaduras de alma abierta.</p>	<p>(Borland, Murphy, Intyre, & Erwin, 1957)</p>
<p>- Polideportivo de la Universidad de Wichita</p> <p>- Theodore Larson.</p>		<p>- Wichita, Estados Unidos.</p> <p>- 1957</p>	<p>- Acero.</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Forma de cúpula.</p>	<p>- Retícula tipo Lamella</p> <p>- Armaduras de alma abierta.</p>	<p>(Prentice, 1957c)</p>
<p>- Domo.</p> <p>- Henry J. Kaiser.</p>		<p>- Hawaii, Estados Unidos.</p> <p>- 1957</p>	<p>- Aluminio</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Forma de cúpula.</p>	<p>- Retícula tipo domo geodésico.</p> <p>- Una capa.</p>	<p>(Prentice, 1957a)</p> <p>(Mason, 1957)</p> <p>(Creighton, 1957a)</p>
<p>-Pabellón de la Industria.</p> <p>- Günter Günshel.</p>		<p>- Berlín, Alemania.</p> <p>- 1957</p>	<p>- Acero</p> <p>- Nodo MERO.</p> <p>- Forma de poliedro</p>	<p>- Retícula en 2 direcciones.</p> <p>- Multi-capas</p>	<p>(Escher, 2009b)</p>
<p>- Union Tank Car Dome (Baton Rouge).</p> <p>- Sinergetics Inc.</p>		<p>- Louisiana, Estados Unidos.</p> <p>- 1958.</p>	<p>- Acero.</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Forma de cúpula.</p>	<p>- Retícula tipo domo geodésico</p>	<p>(Prentice, 1958b)</p> <p>(Battey & Childs, 1959)</p> <p>(Zygmunt Stanislaw Makowski, 1984)</p>

<p>- Oficina de correos.</p> <p>- Deryck.</p>		<p>- Bruselas, Belgica.</p> <p>- 1958</p>	<p>- Madera.</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Paraboloide hiperbólico.</p>	<p>- Retícula en 3 direcciones</p> <p>- Una capa.</p>	(Deryck, 1958)
<p>- Cúpula central de la presa Grandval.</p> <p>- Stéphane du Chateau.</p>		<p>- Grandval, Francia.</p> <p>- 1958</p>	<p>- Acero.</p> <p>- Nodo SDC.</p> <p>- Forma de cúpula.</p>	<p>- Retícula en 3 direcciones</p> <p>- Una capa</p>	(du Château, 1958)
<p>- Centro Internacional de Comercio</p> <p>- Masachika Murata.</p>		<p>- Tokio, Japón</p> <p>- 1958</p>	<p>- Acero.</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Forma de cúpula truncada.</p>	<p>- Retícula espacial en 3 direcciones.</p> <p>- Dos capas.</p>	<p>(Tuboi, 1959)</p> <p>(Ely Burchard, 1961)</p> <p>("Centre International de L'Industrie a Tokio," 1961-1962)</p>
<p>- Domo Calicloth.</p> <p>- Gautam Sarabhai.</p>		<p>- India</p> <p>- 1958</p>	<p>- Acero.</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Forma de cúpula.</p>	<p>- Retícula tipo domo geodésico.</p> <p>- Una capa</p>	("Calicloth dome," 1968-1969)
<p>- Cúpula para centro comercial.</p> <p>- David Libeskind.</p>		<p>- Sao Paolo, Brasil.</p> <p>- 1958.</p> <p>- Forma de cúpula.</p>	<p>- Aluminio.</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Forma de cúpula.</p>	<p>- Retícula de domo geodésico.</p>	(Bloc, 1959)
<p>- Hall Municipal de Viena</p> <p>- Roland Rainer</p>		<p>- Viena, Austria.</p> <p>- 1959</p>	<p>- Acero.</p> <p>- Nodo especial.</p> <p>- Forma de poliedro.</p>	<p>- Celosía tipo Combinada.</p> <p>- Armaduras de alma abierta</p>	<p>(Rainer, 1958)</p> <p>(Bloc, 1958a)</p>

<ul style="list-style-type: none"> - Palacio de los Deportes - Pier Luigi Nervi		<ul style="list-style-type: none"> - Roma, Italia. - 1959 	<ul style="list-style-type: none"> - Hormigón. - Nodo armado especial. - Forma de cúpula. 	<ul style="list-style-type: none"> - Retícula tipo lamella - Una capa 	(Prentice, 1958c) (Lavin Villa, 2014) (Ely Burchard, 1961)
<ul style="list-style-type: none"> - Pabellón Z - Ferdinand Lederer		<ul style="list-style-type: none"> - Brno, República Checa. - 1959. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acero. - Nodo especial. - Forma de cúpula. 	<ul style="list-style-type: none"> - Retícula en 3 direcciones 	(Prentice, 1963a) (Fukui)
<ul style="list-style-type: none"> - Spatial City, bloques elevados - Yona Friedman		<ul style="list-style-type: none"> - París, Francia. - 1959 	<ul style="list-style-type: none"> - - - Forma de poliedro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Retícula en 4 direcciones 	(Rinaldi)
<ul style="list-style-type: none"> - Salón de usos múltiples (Warson Woods Elementary School) - Hellmut, Obata & Kassabaum		<ul style="list-style-type: none"> - Missouri, Estados Unidos. - 1960 	<ul style="list-style-type: none"> - Acero. - Nodo especial. - Forma de bóveda cañón. 	<ul style="list-style-type: none"> - Retícula en 3 direcciones. - Una capa 	(Mason, 1958c)
<ul style="list-style-type: none"> - Oficinas centrales (American Society for metals) - John Terence Kelly		<ul style="list-style-type: none"> - Ohio, Estados Unidos. - 1960 	<ul style="list-style-type: none"> - Acero inoxidable. - Nodo especial. - Forma de cúpula. 	<ul style="list-style-type: none"> - Retícula tipo domo geodésico. - Una capa. 	(Prentice, 1960a) (Mason, 1958b)
<ul style="list-style-type: none"> - Joint Core System - Arata Isozaki		<ul style="list-style-type: none"> - Tokio, Japón. - 1960 	<ul style="list-style-type: none"> - - Nodo especial. - Forma de poliedro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Retícula en 4 direcciones 	(Herron, 1968) (Drew, 1983)

Tabla 3 Edificaciones con estructura reticular triangular 1946-1960.

Con la tabla de edificaciones y proyectos, en conjunto con los investigadores, diseñadores y constructores mencionados es posible determinar un resumen de

las principales características que se desarrollan en este periodo de tiempo, mostradas de manera sencilla en el siguiente diagrama:

Ilustración 276 Cancha de Tenis, Stéphane du Château, París (du Château, 1961-1962).

2.3. Desarrollo de las estructuras reticulares en altura y de grandes luces de 1960-1992. La construcción de edificios de altura; las grandes estructuras y megaestructuras; y las grandes arenas de espectáculos empleando la retícula triangular como solución estructural.

El segundo periodo de estudio propuesto y que abarca las estructuras reticulares triangulares, está basado en un periodo de tiempo donde la construcción de edificios de altura y rascacielos empiezan a emplear la retícula triangular como parte de la solución estructural; así como el apogeo de las propuestas de cubiertas de grandes estadios y palacios deportivos, donde las grandes luces se convierten en la principal característica que mostraban estas estructuras reticulares, al ser estructuras ligeras, fáciles de construir y sobre todo de bajo costo de construcción; finalmente las propuestas de grandes idealistas, visionarios y pensadores que diseñan las llamadas megaestructuras, ante las nuevas necesidades que se empezaban a presentar y que en conjunto con los avances tecnológicos que estaban en constante evolución y desarrollo en la industria de la construcción, plantearían una posible solución del espacio diseñado para aglomerar servicios en una mínima área de tierra.

En este periodo de tiempo, las estructuras reticulares terminan por consolidarse a nivel internacional, al continuar las investigaciones para mejorar su comportamiento estructural y consolidar

Ilustración 277 Gimnasio para la Grammar School,
Stéphane du Château, Carpetras (Gregoire, Biscop,
& Du Chateau, 1961-1962).

el desarrollo constante de todas las características que están siendo aplicadas en el diseño de las estructuras reticulares, además de optimizar el proceso de fabricación y construcción al hacer más eficiente el proceso constructivo con el desarrollo de los nuevos sistemas prefabricados y de unión, en conjunto con los avances tecnológicos que surgían conforme las necesidades de los arquitectos e ingenieros para dar solución a las nuevas propuestas de forma que empezaban a surgir.

La consolidación de las estructuras reticulares triangulares generaron que los ya nombrados constructores y diseñadores en el periodo anterior, concibían en conjunto con los nuevos representantes que empiezan a surgir ideas para poder adoptar esta propuesta de diseño estructural para finalmente proponer proyectos más complejos, elegantes y estéticos, hasta que en algunos casos por la complicación de sus propuestas sean imposibles de construir, pero desde otro punto de vista empiecen a romper los paradigmas establecidos por los especialistas, y den inicio así en este periodo a los nuevos ideales geométricos y constructivos.

Es importante resaltar el descaro que arquitectos e ingenieros empiezan a proponer en sus proyectos, aplicando los nuevos conocimientos adquiridos y que siguen surgiendo en este periodo, hasta llevar las propuestas a un estilo internacional basado en el ahorro energético, minimizando sus costos de los consumos de insumos en el proceso de fabricación, construcción y posterior funcionamiento de las

Ilustración 278 Fábrica de cerveza Mahou, Perpiñá, Sanz e Iglesias, Madrid (Bueno & Calavera Ruiz, 1965).

edificaciones, al hacer más eficiente todos las técnicas y tecnologías que participan durante todo el proceso.

En Asia, principalmente en Japón, inició en este periodo un desarrollo de estructuras reticulares aplicadas principalmente a edificaciones deportivas y públicas, siguiendo la inercia que sucedía en Europa y Estados Unidos, en parte por la reconstrucción necesaria de sus ciudades destruidas por la Segunda Guerra Mundial. Los avances en la tecnología aplicada a la construcción, empezaron a sobresalir en las edificaciones de este país asiático y llamar la atención internacional con las grandes estructuras reticulares que empiezan a plantearse como solución de las envolventes.

Del mismo modo, en este periodo es importante mencionar que algunas de las edificaciones diseñadas y/o construidas, empezaron a sobresalir sobre sus creadores, aunque los nombres de los arquitectos e ingenieros seguirán siendo relevantes ante la importancia de la obra construida, pero el resultado final de estos innovadores y en muchos casos de elegantes proyectos diseñados, serían las ideas principales que sobresalen en el trabajo concluido.

2.3.1. Las grandes cubiertas usadas en estadios, palacios deportivos y edificios públicos.

Aunque en los años 1950's hay un desarrollo notable de estructuras para dar solución a cubiertas de

Ilustración 279 The Civic Arena, Amman & Whitney, Pittsburgh, 1961 (Prentice, 1961b).

espacios deportivos, es en los años 1960's cuando se construyen cubiertas de espacios deportivos de mayores dimensiones capaces de cubrir grandes luces y aumentar la capacidad de espectadores de las edificaciones. Utilizando los nuevos avances tecnológicos como la aplicación de ordenadores para la realización de los cálculos estructurales que dieran solución a los nuevos retos y posteriormente con el surgimiento de programas computacionales aplicados al dibujo digital de los proyectos, facilitaría el proceso de diseño de las innovadoras estructuras reticulares, así como incrementar las propuestas de variantes geométricas que hasta los años 1950's se habían presentado, generando formas más complejas, estéticas y elegantes.

Ilustración 280 The Civic Arena, Amman & Whitney, Pittsburgh, 1961 (Prentice, 1961b).

La construcción de las nuevas estructuras de grandes luces de los años 1960's, marcaron el punto de partida para el auge que se darían en la construcción de estructuras aplicadas como envolventes de palacios deportivos y edificios públicos hasta la actualidad.

Ilustración 281 Capilla del Aire, SOM, Colorado Springs, 1962 (Prentice, 1957b).

The Civic Arena en Pittsburgh inició sus funciones como auditorio, diseñado por Ammann & Whitney y culminado en el año de 1961, y posteriormente dio servicio para la realización de diferentes espectáculos, principalmente deportivos. The Civic Arena fue el primer domo retráctil, convirtiéndose en una de las cubiertas de grandes dimensiones que dan inicio a la construcción de estructuras reticulares para cubrir grandes luces de espacios deportivos y públicos, capaces de cumplir con las necesidades para realizar eventos y actividades que los espectadores empezaban a exigir en diferentes partes del mundo.

En la estructura utilizada para The Civic Arena, se emplea una retícula de costillas radiales rigidizado con correas y arriostramientos en X, generando en algunas partes una retícula de 4 direcciones, siendo la malla muy parecida a la solución reticular de la cúpula Schwedler. En su solución estructural resalta una viga cantiléver, rigidizada por una retícula triangular empleada para soportar las secciones retráctiles de la cúpula.

Con la construcción en el año de 1965 de la gran estructura reticular para el Astrodome de Houston (cuya mente maestra fue el juez Roy Hofheinz, diseñado por los arquitectos Wilson, Morris, Crain & Anderson y la firma de arquitectos Lloyd, Morgan & Jones, con el apoyo de los ingenieros estructurales Walter P. Moore & Associates), se dan inicio el diseño de proyectos de envolventes de grandes espacios deportivos, convirtiéndose en la primera estructura en dar solución a una cubierta para un