



## Arquitectura y Sistemas estructurales, nuevas posibilidades formales

AUTOR Corresponsal\*, Alfredo E. MUJICA YEPEZ

\*Afiliación del autor corresponsal

Dirección: Calle Fernando Castrat 655, Departamento 401, Urbanización Chama, Distrito de Santiago de Surco, Provincia y Departamento de Lima PERU  
Correo electrónico: alfredo\_mujica@hotmail.com

### Resumen (abstract)

Partiendo del sistema estructural predominante en las ciudades: los pórticos de concreto armado, sistema que resulta pesado y costoso, se plantean otras alternativas estructurales a utilizar:

- Las Plegaduras**, basadas en formas laminares por lo general triangulares que se unen formando ángulos diédricos, que forman modelos lineales, radiales o mixtos, algunas plegaduras pueden ser transportables, se explica el proceso para diseñar una plegadura, tomando en cuenta las coordenadas de sus vértices.
- El Paraboloide Hiperbólico**, que se forma en base a cuatro puntos a diferente altura que al unirse forman los bordes de la estructura y al conectarse los bordes opuestos con elementos rectos se forman superficies de doble curvatura que pueden utilizarse en techos dinámicos apropiados para locales deportivos, artísticos, etc.
- Superficies Tensionadas**, cuando se estira una tela, vinil o tejido con cables, mástiles, hasta obtener formas cóncavas y convexas para cubrir grandes luces con poco material, y con una estructura ligera en la que se mantiene el equilibrio y la estabilidad.
- Estructuras Poliédricas**, basadas en los poliedros platónicos y arquimedianos que se forman a partir de polígonos regulares que al unirse cierran un volumen convexo, estas estructuras repiten patrones naturales que se dan en cristales minerales, virus, etc.
- Aprender haciendo**, en base a ejercicios realizados en los cursos de estructuras, se relatan experiencias orientadas al conocimiento de los cinco esfuerzos básicos, la búsqueda del equilibrio en modelos a escala, donde es posible “sentir” los esfuerzos, reacciones y deformaciones de los componentes estructurales, en ciertos casos se experimenta con modelos a escala real, para poder solucionar los detalles que permitan la apropiada estabilidad de la estructura propuesta. Los ejercicios permiten descubrir de manera intuitiva las mejores soluciones estructurales.

**Palabras Clave:** sistemas estructurales, pórticos, plegaduras, paraboloides hiperbólicos, superficies tensionadas, estructuras poliédricas, aprender haciendo.

## 1. Introducción

El Sistema Estructural predominante en nuestras ciudades es el de Pórticos de Concreto Armado (concreto y acero). Los pórticos son estructuras ortogonales que generan una arquitectura ortogonal que limita las posibilidades formales de nuestros proyectos.

Este Sistema Estructural es muy pesado (1 tonelada o 1,000 kg. por metro cuadrado en viviendas, y pesos aún mayores en locales comerciales, de oficinas, etc.) La relación entre el peso propio y la carga que soporta es 10:1, lo cual quiere decir, por ejemplo que una estructura de 10 pisos que tiene un área techada de 200 metros cuadrados por piso, pese  $10 \times 200 \times 1 \text{ ton} = 2,000$  toneladas, soporta una carga de apenas 200 toneladas.

En un país sísmico toda estructura pesada es potencialmente peligrosa. El sistema tiene limitaciones en cuanto a la luz libre entre columnas. Además construir con este sistema es bastante costoso y requiere de tiempos de espera en la construcción (encofrado y fraguado del concreto). En respuesta a estos inconvenientes se plantean conocer y aplicar otros sistemas estructurales más eficientes y ligeros que además hacen posible una arquitectura con mayores posibilidades formales y estéticas. (Ver figura 1)

Ante lo planteado, nos preguntamos: **¿Qué otros sistemas estructurales alternativos podemos utilizar?**, y en respuesta a esta pregunta, planteamos algunos sistemas estructurales que nos permitirán desarrollar mejor nuestros proyectos arquitectónicos. Para lo cual debemos recordar que un sistema estructural es *“la unión estable de elementos diseñados para que funcionen como una unidad que soporta y transmite al terreno las cargas correspondientes, de una forma segura y sin exceder la resistencia de cada uno de los elementos...”* (Ching et. al, 2014, p.2)



Figura 1: Composición fotográfica de edificios con pórticos de concreto armado que muestran columnas, vigas y losas con gran cantidad de concreto y acero, los que limitan la arquitectura a formas ortogonales que resultan pesadas y riesgosas en un país sísmico como el nuestro.

## 2. Sistema Estructural de Plegaduras

El sistema estructural de plegaduras, se basa en **formas laminares** por lo general **triangulares** que conforman sistemas tridimensionales con la unión de sus aristas en **ángulos diédricos**, la rigidez del conjunto se da por la forma de los componentes y la unión de los mismos en sus aristas o bordes. De acuerdo a lo afirmado por Ching : *“Las estructuras de láminas plegadas están compuestas de elementos delgados y anchos unidos rígidamente a lo largo de sus bordes formando ángulos marcados para arriostrarse mutuamente frente al pandeo lateral...”* (Ching et. al., 2014, p.242)

Las plegaduras por su conformación pueden ser **lineales** cuando el módulo de plegado se da en una sola dirección, pueden ser también **radiales**, cuando los módulos se desarrollan en torno a un centro, o también pueden ser plegaduras **mixtas**, cuando son el resultado de la mezcla de formas lineales y radiales.



Figura 2: Composición fotográfica de proyectos de estudiantes, aplicando el sistema estructural de plegaduras, siendo plegaduras lineales la primera y última, y plegaduras radiales la segunda y tercera, los modelos iniciales se hacen por lo general en cartón corrugado delgado.

Las plegaduras se utilizan en el diseño de techos o de estructuras completas que van de piso a techo. Como se puede apreciar en las fotografías anteriores (Ver figura 2). Las formas que se generan ofrecen nuevas e interesantes posibilidades de composición formal, con entrantes y salientes, volúmenes que generan áreas iluminadas con sombras, formas dinámicas que se proyectan en un sentido o en torno a un centro, o también composiciones integradas de techos y muros. (Ver figura 3)

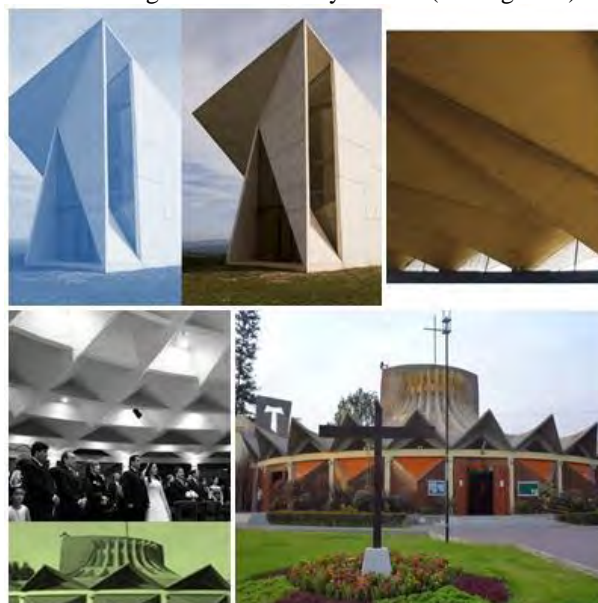


Figura 3: Composición fotográfica de proyectos profesionales y obras realizadas empleado plegaduras, las dos primeras imágenes muestran una iglesia inspirada en los pliegues del origami japonés, luego el techo de un mercado con pliegues que al borde generan aberturas triangulares para la iluminación y ventilación. Las tres últimas corresponden a la Iglesia Cristo Salvador de Surco, con techo a base de plegaduras que se curvan y proyectan hacia el cielo.

Las plegaduras pueden apoyarse directamente en el suelo, no son muy pesadas debido a lo estrecho de las láminas. Se logra gran estabilidad por las formas triangulares. Los pliegues generan ángulos que rigidizan el conjunto. Algunas estructuras son transportables y se despliegan en el sitio asignado. También es pertinente tomar en cuenta la recomendación de Ching: ...*"para evitar que la lámina plegada se deforme en la dirección transversal, es preciso disponer diafragmas verticales o pórticos rígidos. La rigidez resultante en la sección transversal permite que la lámina plegada salve luces relativamente grandes."* (Ching et. al., 2014, p.242)

En la Ciudad de Lima, existe una plegadura hecha con cartón corrugado grueso para un recinto temporal de exposiciones, el plegado se instala en el lugar y se fijan algunos tensores para estabilizarla. Al terminar el evento se es posible compactar todo esta estructura de piso a techo y transportarla en una camioneta. (Ver figura 4)



Figura 4: Composición fotográfica de proyectos académicos de plegaduras en maquetas presentadas junto con las elevaciones laterales y frontales, la imagen final es un recinto temporal de exposiciones en base a plegados en cartón corrugado grueso, instalado en una feria ecológica en Barranco, Lima

Es posible diseñar una plegadura empezando por el trazado en planta de los módulos triangulares y obteniendo los valores en coordenadas  $x$ , y de cada punto en el plano horizontal, para tener las elevaciones se asignan alturas a todos los puntos (coordenada  $z$ ). Tendiendo estos planos se procede a realizar los cálculos para obtener las longitudes de las aristas, para luego proyectar en el plano los triángulos base del modelo tridimensional. Al determinar estos puntos, se definen también los planos de planta y elevaciones que se presentan con la maqueta del proyecto.



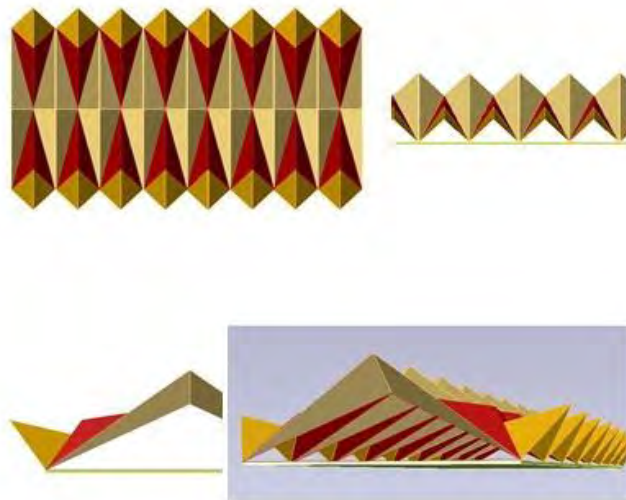


Figura 5: Composición gráfica de un proyecto profesional del autor, para cubrir un evento con más de 500 concurrentes, un plegado lineal en base a tres tipos de triángulo que definen un espacio amplio central y bordes laterales con pliegues que se proyectan hacia el entorno, y permiten la iluminación y ventilación natural del recinto.

### 3. Sistema Estructural basado en Paraboloides Hiperbólicos

Para obtener un paraboloides hiperbólico se plantean 4 puntos, dos en la base y dos en altura (pueden ser a diferentes altura) se unen con vigas de borde a manera de aristas, luego se divide cada arista en 8 o 10 partes iguales, y se procede a unir los puntos de una viga de borde con su similar opuesta.

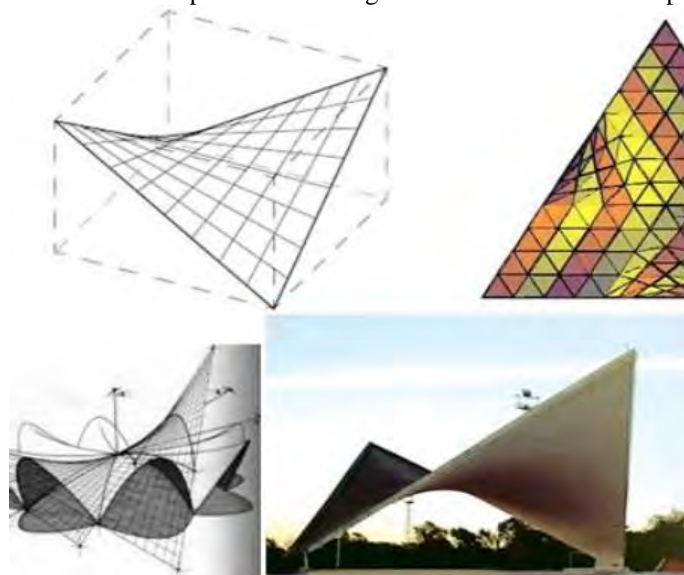


Figura 6: Composición gráfica que muestra cómo se genera el paraboloides hiperbólico entre cuatro bordes y puntos a diferente altura, como se genera la doble curvatura y como se puede obtener formas cóncavas y convexas en forma gráfica, por computadora o en la construcción real.

Se obtiene una superficie curvada en dos sentidos: cóncavo y convexo, esta doble curvatura soporta así esfuerzos de compresión (curva convexa) y de tracción o tensión (curva cóncava). La unión de dos, tres o más paraboloides hiperbólicos origina un techo de carácter dinámico apropiado para las instalaciones deportivas, artísticas, comerciales, etc.



Figura 7: Composición gráfica con paraboloides hiperbólicos realizado en programas CAD en tres dimensiones, además fotografías de modelos de paraboloides hiperbólicos realizados por estudiantes del Curso.

Engel describe de manera clara como funciona un paraboloides hiperbólico, y como se contrarrestan los esfuerzos de tracción y compresión, según lo afirmado: *“La membrana del paraboloides hiperbólico funciona a lo largo de un eje como un mecanismo de arco y, a lo largo del otro, como un mecanismo suspendido. Mientras que los esfuerzos de compresión tienden a deformar la membrana según un eje, los esfuerzos de tracción según el otro eje tienden a contrarrestar esta deformación.”* (Engel, 2006, p.257)

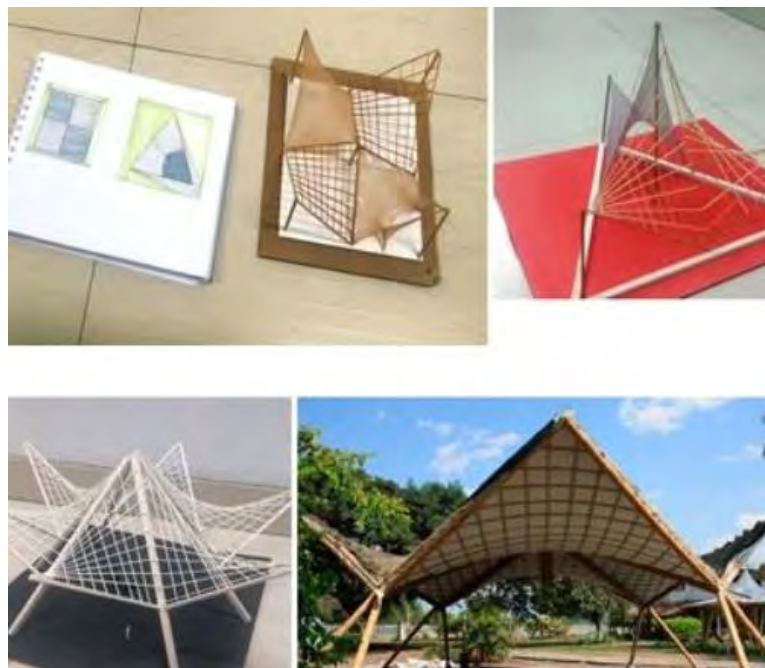


Figura 8: Composición fotográfica de estructuras en base a paraboloides hiperbólicos realizados por estudiantes del Curso, al final estructura culminada en espacio público en base a bambú y cañas.

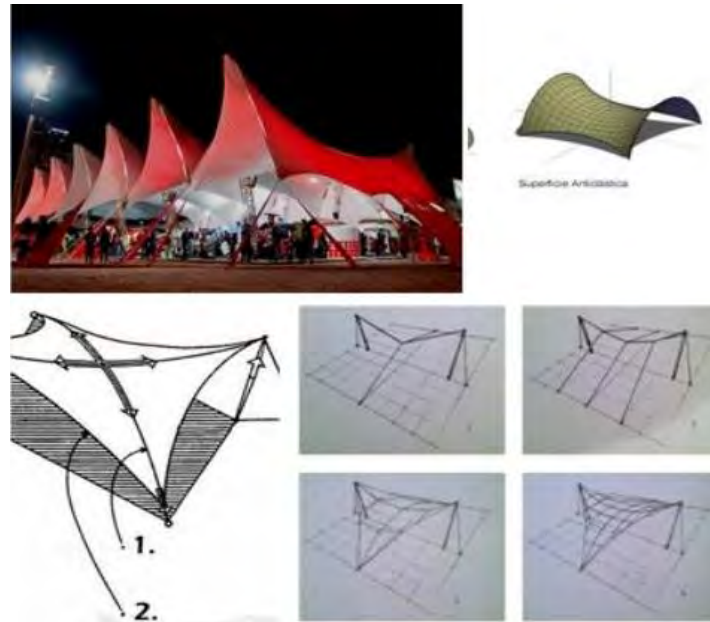


Figura 9: Composición gráfica que muestra cómo se genera la tensiónada bajo el principio de la doble curvatura que se observa en proyectos reales, las formas se ven dinámicas y en equilibrio a la vez.

Para cubrir grandes luces con muy poco material, se generan superficies tensionadas, toda la estructura está sometida a tracción o tensión. Los cables y postes ayudan a dar estabilidad al sistema. Se mantienen en equilibrio gracias a la tensión o tracción.



Figura 10: Composición fotográfica que muestra cómo un estudiante experimenta los esfuerzos de tensión en un modelo a escala. Con postes se obtienen las alturas necesarias y con cables se logra la estabilidad del sistema. A continuación fotos de estructuras reales. En algunos casos los postes pasan a ser estructuras tipo cerchas o armaduras, debido a la intensidad de los esfuerzos que soportan.



#### 4. Sistema Estructural basado en Poliedros.

Los poliedros platónicos y arquimedianos son estructuras convexas conformadas por polígonos regulares de 3, 4, 5, 6, 8, y 10 lados, que al unirse entre sí cierran una superficie cercana a la esfera, los nudos o vértices son iguales y las medidas de Las aristas o lados son también todas iguales.

Los poliedros están en la naturaleza como cristales, algunos minerales y hasta en seres vivos muy pequeños (virus) Las estructuras poliédricas, con barras de igual medida, nudos iguales y teniendo la garantía de su estabilidad y belleza, pueden ser estructuras prefabricadas de fácil montaje y desmontaje.



Figura 11: Composición fotográfica con poliedros realizados por estudiantes, para buscar formas compuestas que se van obteniendo de la unión entre varios poliedros similares o de diferente tipo.

Cuando unimos estructuras poliédricas similares o afines, se obtienen interesantes composiciones, por ejemplo uniendo 5 tetraedros truncados o 5 octaedros truncados que se cierran formando espacios de gran impacto que pueden ser complementados con otros poliedros. Cuando se unen poliedros se logran espacios interiores a modo de ejes que ordenan formas poligonales en profundidad.





Figura 12: Composición gráfica con poliedros unidos formando composiciones tal como sucede en la naturaleza

Actualmente existen muchas estructuras hechas en base a poliedros, desde coberturas para actividades culturales o comerciales, hasta refugios o habitáculos para climas extremos, todas de gran armonía y fácil transporte, montaje y desmontaje. Es posible armar muros inclinados con poliedros, formar espacios con varios poliedros y construir espacios para la meditación, el camping o el juego.

Los domos geodésicos derivan de los poliedros (icosaedro truncado), los pentágonos y hexágonos se triangulan y se genera una superficie semi esférica útil para eventos, clases, talleres de arte, invernaderos, o módulos de exposición o vivienda. Blackell explica como se obtienen las formas geodésicas: “..Los puntos o vértices de los sólidos tocan la superficie de una esfera imaginaria que incluye a la figura. Esta es la característica que Buckminster Fuller utilizaba para convertir a la superficie de un icosaedro en las maravillosas estructuras de las cúpulas geodésicas de hoy...”(Blackwell,1991, p. 161)



Figura 13: Composición fotográfica con formas compuestas a base de poliedros, tanto en coberturas, como en espacios para diversos usos.

Se han construido, previo modelo a escala, geodésicas de 5 metros de diámetro, 3 metros de altura y unos 20 m<sup>2</sup> de área con tubos de PVC (para cables de luz) y pernos, se pueden armar y desarmar, así como cubrir con lona, policarbonato, malla, etc. También se ha armado un poliedro de Arquímedes con 80 triángulos y 12 pentágonos.



Figura 14: Composición fotográfica mostrando geodésicas, primero en modelo a escalas y luego a tamaño real realizadas en diferentes universidades con estudiantes de arquitectura.

## 5. Aprender haciendo, la experiencia de enseñar estructuras a estudiantes de arquitectura.



Figura 15: Se muestran algunos ejercicios realizados en los cursos de Estructuras en diferentes escuelas de arquitectura, la búsqueda de equilibrio tridimensional con cuerdas y lonas, o como estabilizar un poste con cables en diferentes direcciones previo análisis gráfico (vectores). Aquí se tiene a la tensión como esfuerzo predominante.

El objetivo fue mantener en equilibrio un bloque de madera con una determinada inclinación en medio de un cubo, los cables que logran estabilizarlos corren de arriba hacia abajo, de derecha a izquierda y de delante hacia atrás, de forma intuitiva se logra el objetivo logrando además una composición asimétrica pero estable.

Con estos primeros ejercicios los estudiantes descubren y aplican los 5 esfuerzos conocidos, el estudiante vive la experiencia del hombre que tenía que construir un refugio con el material que tenía cerca, la piedra, formando círculos decrecientes hasta llegar a cerrar una semi esfera.

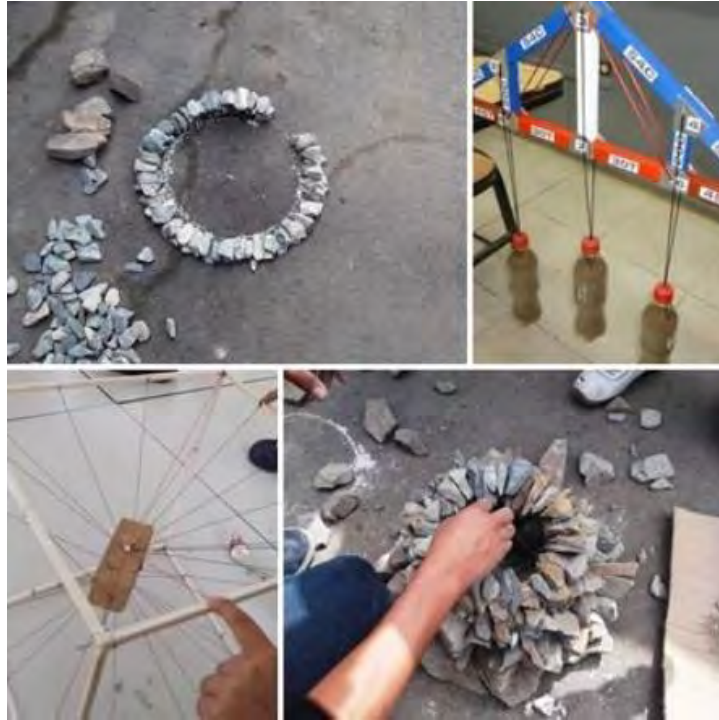


Figura 16: La estructura de forma cupular, requiere de seleccionar las piedras alargadas, para colocarlas con el lado más estrecho hacia el centro, para el trabe de cada hilada. Experiencias con armaduras sometidas a cargas reales, y tensionando un bloque en el espacio.



Figura 17: Torres de cartón y madera que simulan edificios de pórticos de 15 a 20 pisos, previamente se han dibujado los planos y hecho el pre dimensionamiento de columnas, vigas y zapatas. Para aprender que forma es mejor para soportar las ondas sísmicas, simulación con diferentes alternativas y configuración en planta (edificios en forma de C, D E, H, T, X, O etc).



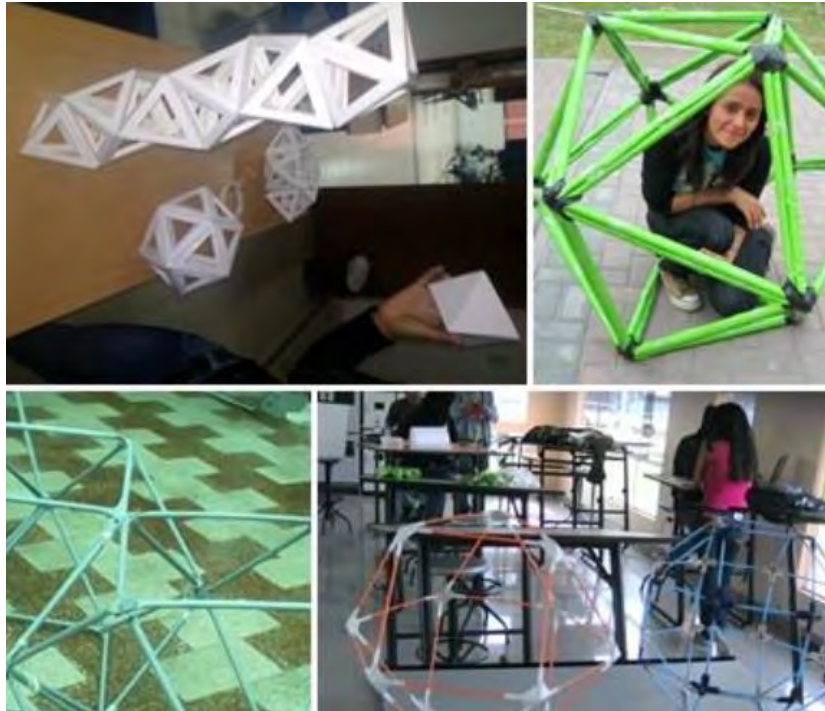


Figura 18: Construyendo poliedros, de cartón, tubos de papel, tubos de PVC, con nudos que ensamblan barras y con pernos en los nudos. Poliedros a escala pequeña y a tamaño real, para experimentar el espacio y las fuerzas.



Figura 19: La experiencia de diseñar, moldear y construir un arco en yeso, controlando los desplazamientos horizontales en la base, los componentes se comprimen unos a otros y llevan las fuerzas hacia los apoyos extremos. Los estudiantes aprenden con diferentes tipos de arcos (medio punto, rebajados, ojival, etc.)



Figura 20: El diseño y construcción de armaduras planas, empieza con el trazado de su geometría, luego la resolución de esfuerzos en cada barra, utilizando el método gráfico por nudos, el cual permite conocer la magnitud y tipo de esfuerzo con un dibujo del equilibrio de esfuerzos en el nudo.

Se procede a construir la armadura en madera, algunas barras que resultaron a tracción son reemplazadas por cables, las barras se pintan de rojo si quedan a tracción y de azul si resultan a compresión, se indica la magnitud del esfuerzo y se unen los nudos con cartelas. Se pasa luego a simular las cargas y verificar que los esfuerzos a tracción se dan rigidizando el cable. Las cargas son botellas plásticas con arena.



Figura 21: Uno de los primeros ejercicios se denomina así: “Llegar lo más alto posible” Consiste en diseñar y construir la torre con la mayor altura posible utilizando un pliego de cartulina estándar. Los estudiantes doblan, ensamblan hasta lograrlo. Después de la experiencia, al leer la bibliografía recomendada descubren que de manera intuitiva aplicaron determinados principios estructurales.

**Citas:**

**Blackwell, William** (1991) La Geometría en Arquitectura, México D.F., México, Editorial Trillas.

**Ching, Francis D.K. et. al.** (2014) Manual de Estructuras Ilustrado, Barcelona, España, Editorial Gustavo Gili .

**Engel , Heino** (2006) Sistemas de estructuras, Barcelona, España, Editorial Gustavo Gili S.L. 1ª edición, 4ª tirada.

**Siegel, Curt** (1966) Formas Estructurales en la arquitectura Moderna, México D.F., México, Compañía Editorial Continental S.A.