

El término de citoesqueleto fue acuñado para identificar a un grupo complejo de estructuras citoplásmicas constituidas por proteínas filamentosas. Las células tienen una forma definida y presentan un alto grado de organización interna, no obstante, pueden cambiar de forma, pueden producir movimientos en su interior a fin de redistribuir diferentes organelos y

fuerzas, no obstante lo más interesante y espectacular es que en ocasiones estos pueden migrar de un sitio a otro.

Encontramos que la forma, organización interna y movimiento celular, dependen directamente de los elementos del citoesqueleto, que constituyen, de forma literal, los huesos y músculos de las células.

Sin embargo debemos tomar en cuenta que el citoesqueleto no es sólo un conjunto de estructuras estáticas encargadas de proporcionar soporte a la célula, sino que constituye un complejo estructural dinámico el cual, según el caso, puede llegar a actuar como un elemento de soporte o bien experimentar cambios en su estructura y disposición, esto es posible por las características específicas de los elementos que lo componen, ya que se pueden ensamblar y desensamblar, según los requerimientos funcionales de la célula.

El citoesqueleto (figuras 1 y 2) es un conjunto de componentes filamentosos que se encuentran localizados en la matriz citoplásmica de las células. Estructuralmente, se han identificado principalmente los siguientes elementos: microtúbulos, microfilamentos y filamentos intermedios.

El esqueleto interno de la célula comparte propiedades con las estructuras *tensegrity*, ya que éstas actúan como una red que transporta fuerzas, a través de elementos estructurales que resisten la compresión, llamados microtúbulos (figura 3) y están constituidos por unidades de tubulina, con un diámetro promedio de 25 nanómetros (nm). Los microtúbulos se combinan con otros elementos que son extremadamente fuertes ante la tensión, los microfilamentos, constituidos por actina (figura 4), tienen un diámetro de 5 a 7 nm e interaccionan con miosina y muchas otras proteínas en el citoplasma. Están involucrados en procesos de movimiento intracelular y participan en fenómenos de contracción. Además existen los filamentos intermedios (figura 5), que tienen un diámetro de 8 a 10 nm, son bioquímicamente heterogéneos, muy frecuentes en células sujetas a tensión mecánica, y constituyen los componentes más estables del citoesqueleto.

Los tres componentes del citoesqueleto están interconectados y forman un reticulado que se extiende desde la superficie celular hasta el núcleo.

# Estructuras espaciales de integridad tensional

HÉCTOR SANDOVAL GONZÁLEZ  
LABORATORIO DE MATERIALES DE ARQUITECTURA  
UAM Xochimilco  
hector7301@gmail.com

Palabras clave:  
Integridad tensional  
Tensión y compresión  
Autoequilibrio  
Autoportante  
Autoformante

## Resumen

Las estructuras espaciales aparecieron a principios del siglo xx diseñados por Alexander Calder, luego fueron perfeccionadas por Kenneth Snelson y Buckminster Fuller, quien le dio el nombre de *tensegrity*, nombre con el cual se reconocen actualmente a este tipo de estructuras. Son estructuras no convencionales, formadas por barras y cables, que trabajan a tensión y compresión, creando sistemas de autoequilibrio, que son autoportantes y autoformantes. Las propiedades matemáticas todavía presentan problemas sin resolver. Es un campo poco explorado, el de la similitud que tienen estas estructuras con las células, estudiadas a partir de la biofísica. Un campo que analiza Ingber. Aquí se expondrá un acercamiento a esta similitud.

Keywords:  
Tensional integrity  
Tension and compression  
Self-balance  
Self-standing  
Self-forming

## Abstract

The spatial structures that emerged at the beginning of the xx century designed by Alexander Calder, were then perfected by Kenneth Snelson and Buckminster Fuller, who named them *tensegrity*, which is the name this type of structures are currently known by. They are non conventional structures, formed by bars and cables that work through tension and compression, creating self-balance systems, they are self-supporting and self-forming. Their mathematical properties are still unsolved. The similarity between these structures and cells, studied from the point of view of biophysics, a field and Ingber is analyzing, has been little explored.

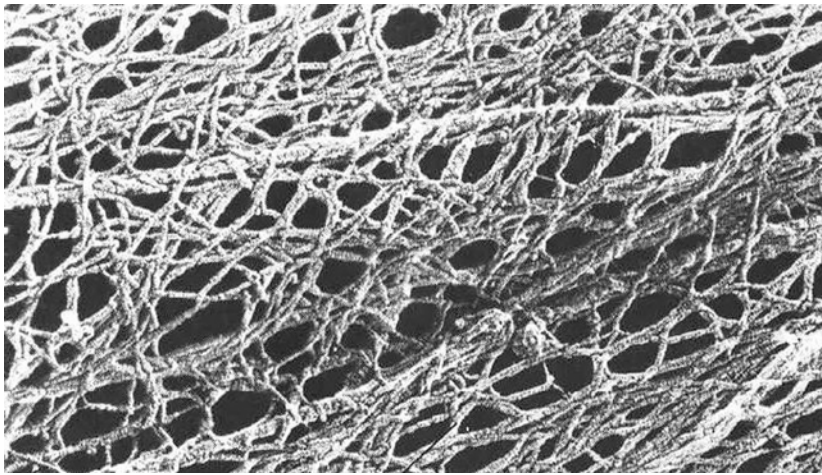


Figura 1. Citoesqueleto  
Imagen tomada de <http://fai.unne.edu.ar> Reproducción realizada con fines didácticos.

### INTEGRIDAD TENSIONAL

La participación del citoesqueleto en procesos regulatorios de las células, a través de sus modificaciones durante la recepción de señales y la producción de una respuesta, nos indica una vez más que se trata de una estructura dinámica, que no sólo funciona como soporte mecánico en la célula.

Donald Ingber, en *Scientific American* (enero de 1998), describió las alteraciones que tienen lugar en la forma de la célula y su citoesqueleto, cuando una célula se deposita sobre diferentes tipos de superficie. Si se coloca en un cristal rígido, la célula se aplana y se expande; en cambio, cuando se coloca en una superficie elástica, frunce la superficie y adquiere su estructura más esférica. Ingber comenzó a explicarse éste y otros fenómenos a través de las propiedades que podrían resultar si la arquitectura de la célula fuera en realidad la de una estructura de *tensegrity*.

Este sistema está construido sobre la base de un modelo arquitectónico común que se encuentra en una sorprendente variedad de sistemas naturales y se conoce con el nombre de integridad tensional la cual, aplicada a las estructuras arquitectónicas, se conoce como *tensegrity*. Este término fue acuñado por el arquitecto e inventor estadounidense Fuller, y con ese nombre se reconocen este tipo de estructuras.

El término *tensegrity* indica que el sistema se estabiliza mecánicamente a sí mismo, en razón del modo en el cual las fuerzas de compresión y tensión se distribuyen y equilibran dentro de la estructura. Las estructuras que responden a este modelo de integridad tensional no alcanzan la estabilidad mecánica por la resistencia de los miembros individuales sino por la manera en la cual la estructura en su conjunto distribuye y equilibra las tensiones mecánicas. En otras palabras, un incremento de tensión en un elemento cualquiera de la estructura se hace sentir en todos los demás.

Este aumento global de presión se equilibra por un aumento de la compresión de determinados elementos en la estructura.

### APLICACIÓN EN ESTRUCTURAS ARQUITECTÓNICAS

Las estructuras de *tensegrity*, fueron creadas a principios del siglo xx por Alexander Calder (Miguel Guzmán, 2002) utilizadas en un nuevo tipo de escultura, la escultura móvil. En el año de 1947 Kenneth Snelson, estudiante de artes plásticas, tratando de desarrollar el estilo de Calder, ideó una escultura basada en nuevas organizaciones de elementos, también extraordinariamente simples, que transponían las ideas de Calder en una nueva dirección. Se puede decir que la estructura inicial que dio origen a su interesante innovación en la escultura, fue el prisma oblicuo de base triangular (foto 1).

Se trata de una construcción de seis puntos en el espacio; los vértices de las bases del prisma, aparecen en una estructura estable, unidos y separados a la vez por nueve cables inextensibles pero flexibles, y por tres barras rígidas que se mantienen en equilibrio en el espacio, sin que ninguno de estos se toque. En la escultura de Snelson los cables tienen una doble misión: mantienen los puntos, los extremos de las barras, a la vez juntos y separados.

Buckminster Fuller, profesor en Black Mountain College, donde Snelson permaneció una temporada, previó la importancia de este tipo de estructura y le dio el nombre de *tensegrity*, que con el tiempo se estableció firmemente.

Las estructuras de *tensegrity* (integridad tensional) toman forma y fuerza al combinar elementos que resisten la compresión con una red de otros elementos bajo tensión, creando un sistema pretensado, como lo son también los domos geodésicos de Fuller y las esculturas de Kenneth Snelson, que desafían la gravedad y se balancean en cables.

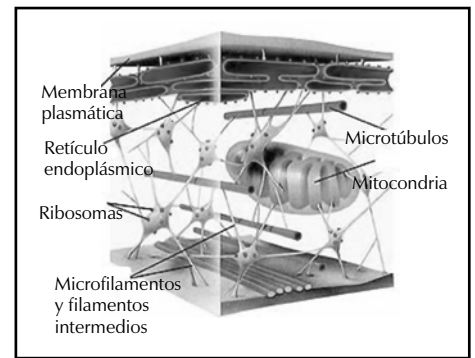


Figura 2. Célula.  
Imagen tomada de <http://fai.unne.edu.ar>  
Reproducción realizada con fines didácticos.

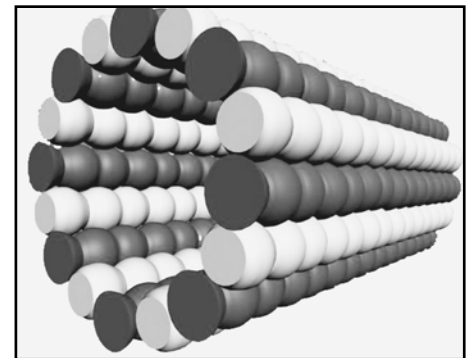


Figura 3. Microtubulo.

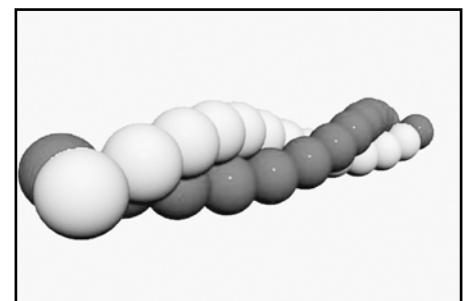


Figura 4. Microfilamento.



Figura 5. Filamento intermedio.  
Las figuras 3, 4 y 5 son modelos elaborados por el arquitecto Alejandro Díaz Tenorio



Los sistemas de *tensegrity* son estructuras espaciales, consisten en cables y barras. Estas estructuras son sumamente flexibles. Desde el punto de vista de la mecánica estructural los cables son un rasgo primordial de estos sistemas. Ellos tienen que ser pretensados de una manera definida para lograr una estructura estable con respecto a las cargas externas.

Estos son algunos ejemplos de lo que se puede lograr aplicando el principio de integridad tensional a estructuras arquitectónicas.

### CONCLUSIÓN

Esta serie de ejemplos muestran que las estructuras de *tensegrity* representan una gama amplia de aplicación en la práctica, así como en la investigación y desarrollo.

Cabe mencionar que tanto las estructuras orgánicas como las inorgánicas y arquitectónicas conservan rasgos similares en su forma, pero esto no es lo único que comparten: las tres están basadas en los mismos principios de las leyes físicas.

El arquitecto Fuller describió al sistema solar como una estructura compuesta con múltiples anillos indeformables de movimiento planetario que se mantienen juntos debido a una tensión gravitatoria continua. Al parecer también nuestro universo, que se encuentra en expansión (en tensión), contiene enormes filamentos de galaxias unidas gravitatoriamente y hoyos negros aislados que experimentan enormes fuerzas compresivas localmente, y posiblemente están regidas bajo las mismas leyes físicas, de tensión y compresión, que actúan tanto en la materia orgánica como inorgánica; a niveles microscópicos y macroscópicos. Tal vez existe un único tema subyacente a la naturaleza, como lo dice Platón: "El Libro de la Naturaleza puede verdaderamente estar escrito en caracteres propios de la geometría", pero que de igual manera, se rigen bajo los mismos principios de construcción.

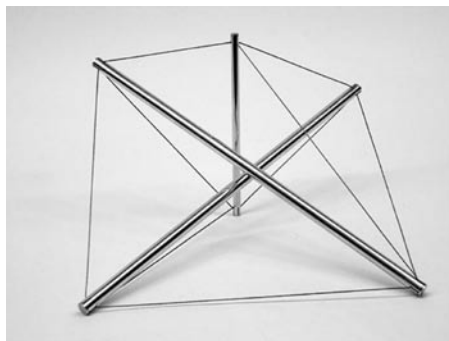
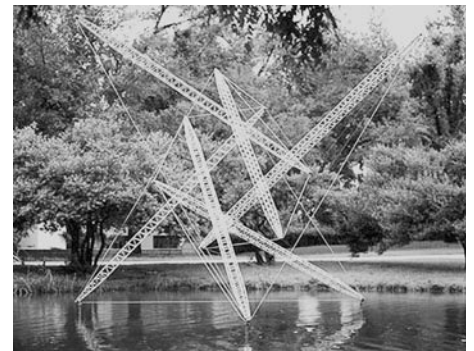
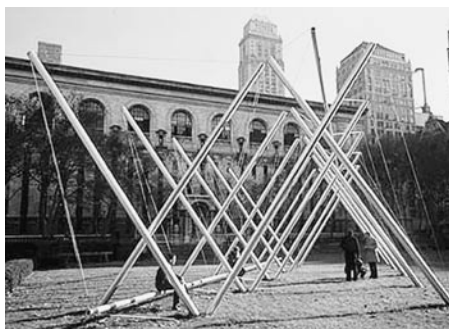


Foto 1. Prisma oblicuo de base triangular.



Northwood, 1969.

Materiales: acero anodizado y acero natural.  
Colección: Northwood Institute, Cedar Hills.



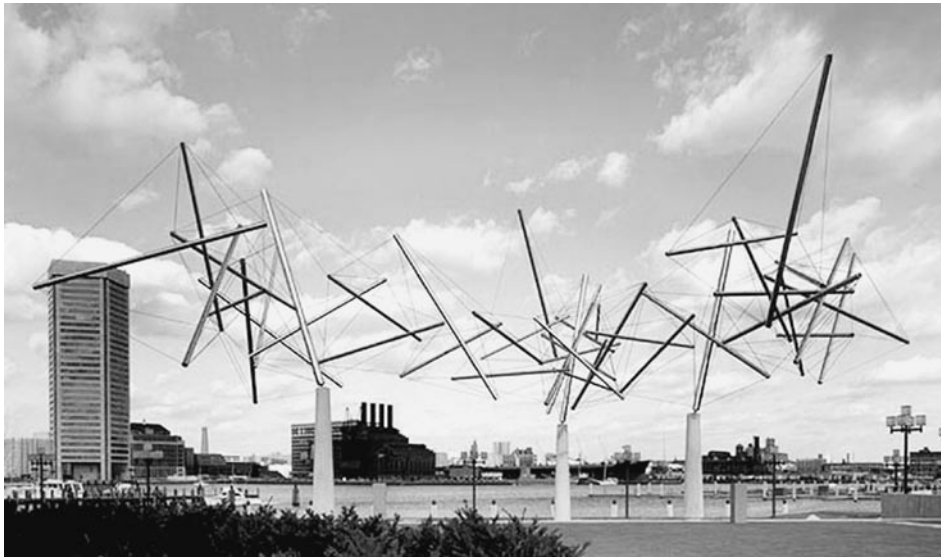
Avenue K, 1968.

Materiales: alumnio y acero.  
Colección: Hannover, Alemania.

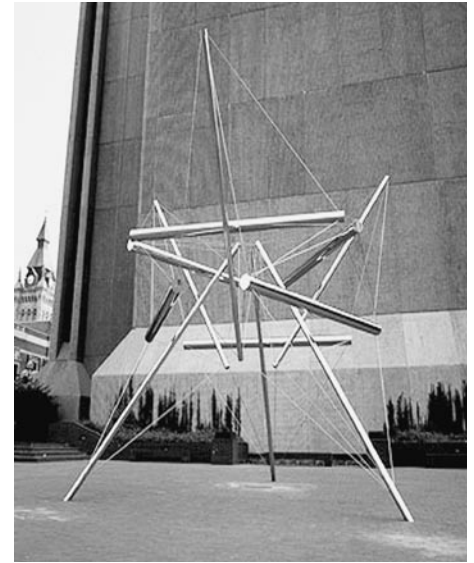


V-X, 1968.

Materiales: acero.  
Colección: Columbus Museum Art.



Easy Landing, 1977.  
Material: acero.  
Colección: City of Baltimore, EUA.



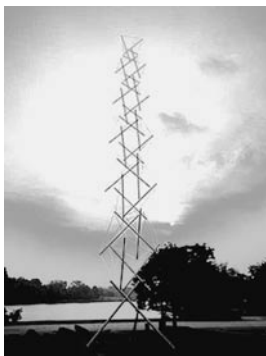
Coronation day, 1980  
Material: acero.  
Colección: City of Buffalo, EUA.



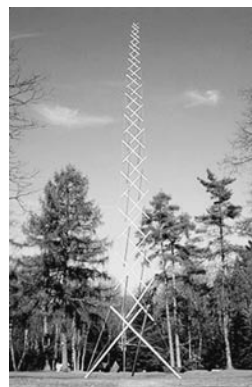
B-Tree.  
Material: acero.  
Colección: National Institutes of Health, Bethesda, MD.



Dragón, 2000 - 2003  
Material: acero



E.C. Column, 1969 - 1981.  
Materiales: acero y aluminio.  
Exhibición: Albright-Knox Art Gallery.



Needle Tower II, 1969.  
Materiales: acero y aluminio.  
Colección: Kröller-Müller Museum, Otterlo, Holland.

## BIBLIOGRAFÍA

Ingber, D.E., 2003, "Tensegrity I. Cell Structure and hierarchical systems Biology" *Journal of Cell Science*, (116): 1157-1173.

Revisado en: <http://intl-jcs.biologists.org/cgi/content/full/116/7/1157>

Ingber, D.E., 2003, "Tensegrity II. How structural networks influence cellular Information-processing networks", *Journal of Cell Science*, (116):1397-1408.

Revisado en: <http://jcs.biologists.org/cgi/content/full/116/8/1397>

Ingber, D. E., 1998, "The Architecture of Life", en *Investigación y Ciencia*, marzo, 48-57.

Brown, T.L., y B.E. Burnten, 1993. *Química Orgánica central*, Prentice-Hall, Quinta edición.

Jiménez, Luis Felipe y Horacio Merchant, 2003, *Biología celular y Molecular*, México, Prentice-Hall.

Páginas web visitadas:

<http://axxon.com.ar/zap/czapping0120.html>

[www.skatelescope.org](http://www.skatelescope.org)

[www.sproochbrugg.ch](http://www.sproochbrugg.ch)

<http://fai.unne.edu.ar>

[www.libertaddigital.com](http://www.libertaddigital.com)

<http://www.calder.org>