

La tensegridad, modelo biomecánico para la Osteopatía

Por Jean –François Mégret DO (Francia)

Artículo publicado en la revista APOSTILL n° 14 (Invierno 2004)

Traducción de: Gilles Drevon Lieffroy DO, MROA

La tensegridad, concepto arquitectural y mecánico innovador, sigue injustamente poco conocido no solamente por el público sino también por la comunidad científica. Injustamente pues la tensegridad, lejos de ser una ilusión es, desde medio siglo objeto de aplicaciones puntuales por cierto pero muy reales.

En arte plástico las fascinantes esculturas de Kenneth Snelson que parecen desafiar las leyes de la gravedad se erigen según el principio de tensegridad (fig.1).

En el campo de las obras arquitectónicas, dos realizaciones creadas según este principio marcaron la historia: el pabellón estadounidense de la exposición universal de Montreal en 1967 y el Georgia Dome de los J.O. de Atlanta. Recientes proyectos arquitectónicos dejan presagiar una segunda ola prometedora.

Es indudablemente en el campo de la biología celular que la aplicación del principio ha sido hasta hoy la mas fecunda, pues la analogía entre los sistemas de tensegridad y la organización de lo vivo no se les escapó a los anatomistas y biomecánicos de la célula.

Principio arquitectónico aplicado a lo vivo: tal propuesta solo podía interpelar a los terapeutas particularmente a los osteópatas los cuales, desde Still, fundan su práctica sobre consideraciones de orden mecánico

En un momento en que los fundamentos de la osteopatía están puestos en tela de juicio por los mismos osteópatas, en un momento en que la osteopatía debe imperativamente anudar relaciones con la comunidad científica, particularmente la comunidad medica, para que el reconocimiento no sea solo un proyecto sociopolítico, proponemos en adelante examinar de que manera un concepto físico-matemático la tensegridad, esclarece algunas de las bases de la osteopatía.

La comprensión del principio mecánico tal como lo definen ingenieros y físicos así como el conocimiento de sus principales propiedades constituyen un prerrequisito indispensable para entender cualquier aplicación en biología .Presentamos mas adelante las nociones necesarias y suficientes en la materia .

El modelo de tensegridad aplicado a la biomecánica celular cumplirá pronto sus treinta años de existencia .Su pertinencia es ampliamente reconocida, el numero y el contenido de publicaciones que lo involucran dan fe de eso .Lo describimos seguido por algunas conclusiones relacionadas con la osteopatía.

Con la aplicación de la tensegridad a los sistemas microscópicos penetramos en un campo muy conjetural. Examinaremos sus principales desarrollos tomando en cuenta su alcance conceptual y médico.

En fin las relaciones entre el conjunto de estos datos y la osteopatía se abordaran. Ciertas propuestas conducen a volver a discutir teorías consideradas adquiridas .La osteopatía debe buscar referencias positivas y actualizadas. Still en su época, lo hacía con fervor.

Un principio arquitectónico innovador

La paternidad del neologismo “tensegridad” del inglés “tensegrity”, contracción de “tensional integrity”, pertenece al arquitecto y visionario estadounidense Richard Buckminster Fuller, creador de los domos geodésicos y primer teórico de la tensegridad. En 1929 Fuller explora un nuevo principio estructural separando los elementos en compresión de los elementos en tensión, oponiéndose en eso a los sistemas convencionales tributarios de una compresión continua por acción de la gravedad para asegurar su estabilidad.

Las primeras estructuras de tensegridad con barras y cables nacen a los fines de los años 40 de la mente y de las manos de un alumno de Fuller, el escultor Kenneth Snelson. En Francia, simultáneamente y en forma independiente, el arquitecto David Georges Emmerich elabora estructuras similares que llama autotensoras.¹

“Tensión continua, compresión discontinua “

Estos pioneros han explotado el “simple” o “equilibrium” sistema de tensegridad más simple. Constituido por tres barras y nueve cables que se unen por seis nudos, tiene el aspecto de un prisma triangular cuyas dos bases equiláteras formadas por cables están torcidas en tirabuzón de 30 grados, angulación que corresponde a la posición de auto estabilidad (fig.2). Las tres barras, comprimidas en el seno de la red de cables no se encuentran. En otros términos la tensión (cables) es continua y la compresión (barras) es disociada. De ahí la definición general siguiente propuesta por los arquitectos R.Motro y V.Raducanu: *“Un sistema de tensegridad es un sistema en estado de auto equilibrio estable incluyendo un conjunto discontinuo de componentes comprimidos al interior de un continuum de componentes tensos.”*

El simple constituye la cabeza de una multitud de módulos regulares derivados de los prismas y de los poliedros griegos (fig.3). Más recientemente, las matemáticas unidas a la herramienta informática permitieron el génesis de formas irregulares perfectamente auto estables. La unión de estos módulos elementales conduce a estructuras complejas de forma lineal (mástiles), plana (rejas), tubular (fig.4), o tridimensional (fig.10). Estas estructuras de barras y cables constituyen las estructuras clásicas explotadas por los ingenieros y tomadas como modelos por los biólogos.

Subrayemos que las estructuras en tejidos triangulados y los sistemas geodésicos (domos) tienen un parentesco estrecho tanto en materia de concepción como de comportamiento mecánico, con los sistemas de tensegridad.

Más ampliamente aún los biólogos distinguen dos puntos de vista. El primero, estructural, en el cual los elementos en compresión son internos al sistema (sistemas clásicos de barras y cables). El segundo, energético, donde la tensión es equilibrada por elementos internos o externos al sistema. Según esta segunda acepción, la telaraña, la rueda de rayos, el “Georgia Dome”, forman sistemas de tensegridad *lato sensu*.

Tensegridad y tejidos biológicos: Analogías morfológicas y funcionales

Como el tonel en el cual las láminas de roble están comprimidas por los cercos de junco (o de hierro), estos mismos estando mantenidos en tensión por la presencia de las láminas, los sistemas de tensegridad presentan un estado de esfuerzos internos mutuamente equilibrados o estado de auto-mantenimiento.

Dos duplas estructura-función resultan de eso: “Tensión-Cohesión” y “Compresión-Solidez”. Estos dos tipos de esfuerzo, tensión y compresión se revelan indisociables para la

funcionalidad y la perennidad de los sistemas que son funcionalmente autónomos y totalmente independientes de la gravedad.

Consecuencia del auto-mantenimiento: Las características mecánicas de los elementos intervienen para el cálculo de los estados de equilibrio. Un nudo desplazado volviendo a su posición inicial una vez suprimida la acción exterior, los mecanismos son llamados

1-Los relatos contradictorios sobre la creación de la tensegridad están contados en un número del *International Journal of Space Structures* [22].

infinitesimales o de segundo orden. El *símplex* posee así un mecanismo helicoidal (traslación + rotación). (Fig.2)

Los poliedros elementales poseen un solo estado de auto-mantenimiento (con respecto a una sola constante). Las estructuras complejas pueden poseer varios, estos mismos siendo combinaciones de estados elementales independientes, locales (implicando elementos localizados) o globales (implicando elementos repartidos sobre el conjunto de la estructura). Existe una relación entre el nivel de auto-mantenimiento y la respuesta a una excitación armónica; a cada estado de auto-mantenimiento corresponde así una frecuencia vibratoria propia.

Su carácter reticulado y tridimensional así como la presencia de un auto-mantenimiento confieren a los sistemas de tensegridad un comportamiento mecánico casi neumático. La membrana del globo es análoga a la red de cables flexibles y el gas comprimido al conjunto de las barras en compresión. Así para un largo dado de los cables, alargando progresivamente lo largo de las barras de un módulo, tenemos la ilusión de inflarlo. Las estructuras se revelan por eso muy livianas con respecto a sus resultados mecánicos. Una señal mecánica transmitida al sistema, en un punto y según un eje dado, provoca una redistribución de los esfuerzos en todas las direcciones. Eso da cuenta de la capacidad de absorción de los choques de estas estructuras.

Por modificación controlada y progresiva de lo largo de los elementos, es posible deformar y doblar ciertas estructuras. Además, estas estructuras presentan la particularidad de no poseer ningún elemento trabajando en flexión como lo hacen una viga o una consola puesto que las barras reciben solamente fuerzas axiales. No hay pues nunca presencia de momento de fuerza. Los distintos elementos pueden desempeñar simultáneamente el rol de soportes de fuerzas, de elementos sensibles y de elementos motores en un sistema dominado. Estas consideraciones hacen de las estructuras de tensegridad unos modelos ideales para el desarrollo de sistemas “inteligentes”.

Todos los estudios han mostrado que las estructuras de tensegridad no siguen la ley de Hooke; el comportamiento bajo carga (variación de la fuerza en función de la deformación) no es lineal. Las estructuras de tensegridad y los tejidos animales presentan curvas de carga de aspecto similar en forma de “J” (Fig.5). Al comienzo, en tracción, una pequeña fuerza provoca una gran deformación, luego se vuelve difícil aún con una gran fuerza, deformarlas más; este fenómeno se explica por la alineación progresiva de los elementos (barras y cables) en la dirección de la tracción inicial (Fig.6).

El conjunto de estas calidades morfológicas y funcionales: aspecto reticulado, tensión interna, comportamiento no lineal, curva en “J”, etc..., evoca infaliblemente los tejidos vivos. En particular, las parrillas de tensegridad de concepción reciente no proceden más del armado de módulos sino que se parecen según la opinión de sus autores, a verdaderos tejidos de fibras. La analogía con la matriz extracelular o fascias se impone al anatomista, los tubos de tensegridad evocando las vainas conjuntivas de las vísceras huecas: adventices de las arterias, cerosas digestivas, etc... (Fig.4)

Un modelo mecánico para la célula

Las analogías entre los sistemas de tensegridad y lo vivo no se le escaparon a Fuller pero fue en 1975 que un anatomopatologo de Boston, Donald Ingber inicio investigaciones sobre la tensegridad como modelo biomecánico para la célula. En aquella época el quedo impresionado por la semejanza de comportamiento entre los módulos de tensegridad y las células en cultivo; como el modulo, la célula se aplasta cuando se fija sobre el substrato y se retrae cuando se libera de el (fig. 7).

Entre matriz extracelular y núcleo: el citó esqueleto, red tridimensional “premodelado”

El modelo de tensegridad pertenece al grupo de los modelos discontinuos o estructurales, modelos que toman en cuenta las interacciones espaciales y temporales de los elementos estructurales.

La puesta en evidencia de microestructuras específicas permitió elaborar un esquema morfológico y funcional muy general (17,46).

Primero la adherencia de la membrana celular a la matriz extracelular (M.E.C) o a las células vecinas no se establece de forma uniforme sino por medio de receptores específicos (integrinas, cadherinas,...) acoplados con el citoesqueleto. Estos receptores se agrupan en el seno de sitios comparables a puntos de soldadura: complejos focales de adherencia entre células y MEC, complejos de unión (desmosomas , zonula adhaerens) entre dos células.

El citoesqueleto (C.E.Q), red tridimensional de proteínas filamentosas es el sitio de un estado de premodelado, el cual es generado activamente por la red contráctil de actomiosina (presente en todas las células) y, pasivamente por la distensión a través de los complejos de adherencia y por las fuerzas osmóticas. Los microfilamentos de actina (M.F) y los filamentos intermediarios (F.I de keratina por ejemplo), soportan la tensión. Ella esta equilibrada por los elementos discretos resistentes en compresión: zonas de adherencia a la MEC, microtubulos (M.T) y MF juntos en “fardos”.

El núcleo aparece cableado con la membrana celular por las tres componentes del CEQ de manera tal que toda fuerza recibida a la periferia celular esta transmitida via el CEQ a la membrana nuclear y al nucleoplasma (fig.7).

Durante el proceso de división, el huso mitótico funciona como una estructura de tensegridad, los mismos cromosomas integrándose en el equilibrio de las tensiones.

Así se va perfilando a la escala celular la idea de una jerarquía estructural, los sistemas de orden superior (célula) conteniendo estructuras de tensegridad de orden inferior (red intranuclear, huso).

Las experiencias sobre culturas celulares y sobre una célula aislada mostraron una similitud de comportamiento mecánico entre la célula y diferentes módulos de tensegridad. El premodelado y la rigidez celular, sus interrelaciones, son analizadas, medidas y cuantificadas. En el seno de diversos modelos mecánicos propuestos, aún si hace objeto de debates apasionados [21], aparece que el modelo de tensegridad permite predecir precisamente el comportamiento de células vivientes [1,40, 47, 48].

Un soporte para la mecanotransducción y la regulación del ciclo celular

La tensegridad fue propuesta para rendir cuentas de varios fenómenos ligados a la mecanotransducción, que se traduce por la transformación de una señal mecánica en una respuesta biológica [4, 19].

Hay que saber que los complejos de adherencia focales reagrupan alrededor de las moléculas de adherencia propiamente dichas la mayor parte de las moléculas que intervienen en la transducción de señal (receptores de los factores de crecimiento, canales iónicos, ...). Asimismo, en el nivel de la unión neuro-muscular, el estiramiento de la membrana de la motoneurona aumenta la liberación del neuromediador y del Ca^{++} , todo esto en un plazo (1 a 2 ms) del cual solo un esquema mecánico puede rendir cuentas.

Por otra parte, la parte más grande de las reacciones del metabolismo celular se efectúan en un estado sólido; las enzimas y los substratos implicados estando relacionados a los elementos del CEQ y de la red intranuclear (fig. 8). Por ejemplo, las mRNA se localizan preferencialmente en las intersecciones de la red de actina. Efectivamente, una señal mecánica a nivel de la membrana provoca la reagrupación y la localización de mRNA y de ribosomas en el seno de un microcompartimiento del CEQ, modulando en esto la síntesis protéica.

El crecimiento axonal se apoya sobre un modelo termodinámico (polimerización de los MT), el mismo dependiente de un modelo de tensegridad (equilibrio de fuerzas entre MT, MF y MEC).

El modelo de tensegridad está evocado para rendir cuentas de hechos ligados a la regulación del ciclo celular y a la morfogénesis [2, 16]. Si la importancia de la adherencia entre las células y la matriz extracelular es reconocida desde hace tiempo, se admite ahora que la forma celular y el nivel de remodelado del CEQ se revelen determinantes. Entre otros, estos dos factores modulan directamente la expresión de dos proteínas controlando el ciclo celular (ciclina D1 y p27kip1).

Asimismo, muy esquemáticamente, observamos que la célula crece y se divide mientras esté estirada, inicia un programa de muerte (apóptosis) cuando permanece retractada, y se diferencia por un grado intermedio de extensión. Este proceso ilustra la relación entre la estructura y la función a nivel celular (fig.9).

Tensegridad celular y Osteopatía

Para el osteópata, el modelo de tensegridad aplicado a la célula presenta ventajas múltiples: La tensegridad materializada por el cableado entre todas las microestructuras permite comprender cómo la célula responde inmediatamente a los estímulos mecánicos externos, fisiológicos, patogénicos o terapéuticos. La brevedad de los tiempos de latencia ha sido subrayada más arriba. **Las vías mecánicas y la maquinaria bioquímica están íntimamente asociadas.** Las fuerzas mecánicas soportadas por los tejidos y células interfieren constantemente sobre el metabolismo general y la expresión de los genes (crecimiento, diferenciación, ...). Cuenta tenida de la importancia fisiológica de estas consecuencias el acto osteopático inducirá efectos que se prolongarán en el tiempo. Así nos volvemos a encontrar con el pensamiento de Still cuando afirma que la osteopatía favorece la utilización del "laboratorio químico" del cuerpo [44].

El modelo de tensegridad celular se refiere ampliamente a la matriz extracelular. Su integridad, sus propiedades bioquímicas y estructurales, la calidad y la cantidad de las relaciones establecidas con la célula, condicionan el mantenimiento de la forma celular y de la tensión isométrica intracelular. Esta matriz representa la sustancia continua, ramificada

presente en todas partes que sostiene, envuelve, estructura todas las células y tejidos del cuerpo, en otros términos la red de las fascias. **El citoesqueleto verdadera “fascia intracelular” no hace sino prolongar la gran red facial extracelular.**

Células, elementos microestructurales y moleculares presentan propiedades vibratorias con armónicos complejos. Los sistemas de tensegridad desempeñan así el papel de osciladores armónicos acoplados. **Las interacciones vibratorias “atravesan” un “tejido matricial de tensegridad”: matriz nuclear, matriz celular (CEQ) y matriz extracelular las cuales se acoplan para equilibrarse con oscilaciones biológicas de la célula, desde la periferia celular hasta el DNA.** Este acoplamiento da cuenta de procesos de amplificación, o inversamente, de atenuación de señal. El nivel de rigidez celular actúa como un filtro mecánico para ampliar, modular o suprimir las informaciones en un sentido o en el otro. ¿Podemos generalizar estos fenómenos a través de todas las escalas estructurales desde la célula hasta el cuerpo entero? El estudio de los sistemas macroscópicos permite iniciar la reflexión sobre esta hipótesis seductora.

Un modelo biomecánico a la escala del organismo

Insatisfecho de los modelos biomecánicos clásicamente propuestos para el raquis, Stephen Levin cirujano ortopedista 2, descubre con la tensegridad numerosas respuestas a sus preguntas.

La transmisión de los esfuerzos se apoya sobre los tejidos blandos, soporte de una tensión continua.

Estudiando las consecuencias ficticias consecutivas a su aplicación sobre el organismo, Levin muestra que las leyes del ingeniero se revelan insuficientes para describir el comportamiento mecánico de los sistemas biológicos [29]. Uno relaciona estas conclusiones con las confesiones de Fryette muchas veces sorprendido por las facultades de resistencia y de resiliencia del raquis y de las articulaciones sacroilíacas [9, 10].

Por otra parte, Chen y Ingber muestran que un sistema reposando principalmente sobre la tensión reduce su masa y sus exigencias energéticas [3]. Gordon agrega la noción de fiabilidad subrayando que lo vivo opta lo más a menudo por un funcionamiento en tensión [14]. Tal es el principio que aparece en la edificación de los vertebrados: los huesos resistentes en compresión forman elementos minoritarios en número y en volumen incluidos en la amplia red músculo-fascial.

Para Levin, la pelvis funciona como un sistema de tensegridad en el sentido amplio de la palabra, la rueda de rayos flexibles [25]. El sacro no está mas “suspendido” a los dos iliacos como una nácula sino que representa el centro de una rueda cuyos rayos en tensión son el sistema músculo- ligamentario y los iliacos la llanta. Así sea cual fuere la posición del cuerpo, el sacro sigue con la posibilidad de transmitir fuerzas de gran intensidad proviniendo de cualquier dirección. El mismo esquema se aplica a la articulación del hombro donde el centro es la escápula [27]. Podemos agregar un tercer ejemplo: el hueso hioides.

De manera general, la dirección de las fuerzas recibidas por las articulaciones del cuerpo – funcionando casi sin fricción – esta muy raras veces normal a nivel de las superficies articulares. Las vértebras no están estabilizadas por la gravedad y el raquis no puede funcionar como un pilar. Así que para Levin, la transmisión de los esfuerzos se debe esencialmente a los tejidos blandos, soporte de una tensión continua [28].

¿El organismo sistema de tensegridad jerarquizado?

El modelo inicialmente propuesto por d'Arcy Thompson y seguido por Gordon es la estructura en malla [7,14]. Las imágenes anatómicas tienen muchos de estos dispositivos en espiral entrecruzados (musculatura paravertebral, capas fibrosas del disco intervertebral, aparato ligamentario de la rodilla, trabéculas óseas). La malla es auto estable, sus elementos se articulan libremente sin palanca ni punto de apoyo pero sigue siendo un sistema estático. Así solos los sistemas de tensegridad entre los cuales el módulo icosaédrico (6 barras y 24 cables), elegido como tema por Levin, funcionan según un modo dinámico.

2- Stephen Levin fue profesor asociado al Colegio de Medicina Osteopática de la Universidad de Michigan. Es miembro de la American Society of Biomechanics.

La noción de jerarquía, considerada anteriormente, se encuentra en el nivel macroscópico. Esquemáticamente, los módulos icosaédricos se unen para formar estructuras de orden superior, y así sucesivamente (fig. 10).

A través de las escalas de organización sucesivas, las fuerzas recibidas por el organismo entero o por una de sus partes se transmiten al nivel celular. Para Ingber, este proceso constituye un elemento explicativo de remodelación ósea [18]. Esta organización jerarquizada posee un papel protector (“amortiguador”) las fuerzas del orden del newton, recibidas a la escala del cuerpo, debiendo ser “diluidas” para llegar a ordenes 10⁶ a 10¹² inferiores, “comprensibles” por la célula. De esta manera, la piel y los tejidos en general no se rompen con el mínimo estiramiento, y el organismo puede resistir a choques de una violencia a veces excepcional.

El cuerpo de un vertebrado forma un sistema auto modelado en tensión-i.e. de tensegridad *lato sensu*, energético – los huesos, elementos discretos, comprimidos elevados en el campo de gravitación, en equilibrio con la red músculo-fascial en tensión. Para afirmar la tensegridad *stricto sensu* deberíamos poder excluir toda transferencia de fuerza directamente de hueso a hueso. Para ciertas articulaciones (hombro, ...) y en ciertas posiciones no puede ser de otra manera. Los tejidos blandos solos soportan esta transferencia.

Cuanto a generalizar el proceso al cuerpo entero, Levin avanza varios argumentos anatómo-clínicos en este sentido [26]. Aunque los estudios biomecánicos clásicamente enseñados (para los sistemas macroscópicos) no hayan abordado estas nociones todavía, la sofisticación creciente de las técnicas de medida y de modelización numérica permitirá sin duda en el futuro atribuir una parte de verdad a las hipótesis y modelos propuestos³.

Un concepto pertinente para la Osteopatía

De entrada con Lee debemos subrayar que Sutherland definiendo el sistema cráneo-sacro, le atribuye todas las características de un sistema de tensegridad [23]. La dura madre y sus pliegues intracraneales soportan una tensión “recíproca”, los huesos del cráneo cerebral y del eje raquídeo formando los elementos discretos en compresión. Así, desde 1939, Sutherland emite para un sistema biológico la hipótesis de un funcionamiento mecánico que se apoya sobre la existencia de una tensión continua.

Las relaciones entre la tensegridad y la Osteopatía han sido abordadas por Cummings en 1994 [5], éste poniéndose más de acuerdo con Lee recientemente para afirmar que “*después de haber progresado en su comprensión y sus aplicaciones en biología, el modelo de tensegridad representará uno de los conceptos más pertinentes para la comprensión del sistema músculo-esquelético*” [6]. La tensegridad aparece igualmente en el programa del Sutherland Cranial College. En Alemania un artículo reciente de la revista “Osteopatische Medizin” se refiere a ella [31]. Muy recientemente dos tesis de fin de estudios osteopáticos

han sido dedicadas al tema. Gilles define el cuerpo humano como un sistema reticulado fluídico organizado en sistema de tenseguridad concluyendo sobre la importancia del rol del agua y de las fáscias [13]. Nuestra tesina habiendo sido dedicada a la tenseguridad en sus relaciones con la Osteopatía, enumeramos más adelante algunas de nuestras reflexiones y conclusiones [32].

El osteópata aprecia los movimientos menores, mecanismos infinitesimales que traducen las capacidades de deformación tisular

Algunos conceptos técnicos merecen ser reevaluados a la luz del modelo de tenseguridad. Los movimientos menores descritos por el osteópata corresponden a los mecanismos infinitesimales, a las deformaciones de segunda importancia propias de los sistemas de

3- El funcionamiento de un módulo de tenseguridad poliédrica es abordable mediante algunos conocimientos de orden mecánico. Para una estructura compleja, jerarquizada, deformable, móvil e inteligente, el problema tiene otra dimensión. El concepto analítico no sirve aquí. Peor, aleja del tema. La tenseguridad que se aparenta a los sistemas dinámicos complejos donde la interacción es la regla, no se concibe en definitiva sino en términos de globalidad.

tenseguridad. Lejos de ser adaptativos ellos atestiguan la continuidad de tensión clave de una función articular fisiológica. El movimiento mayor corresponde al “doblamiento” de las estructuras – consecuencia de las variaciones en el largo del tejido motor – eso conservando un automodelado basal relacionado en parte a la tensión ligamentaria.

Una misma palabra “movimiento” describe dos “mecanismos” bien diferentes: La deformación (movimientos menores/biomecánica “osteopática”), y el desplazamiento o movimiento en el sentido común (movimientos mayores/biomecánica “clásica”). En fin de cuentas existe una sola biomecánica la osteopatía tratando principalmente los movimientos de segundo orden.

Durante el test osteopático, el profesional aprecia la calidad de los movimientos menores, dicho de otra manera las capacidades de deformación tisular como consecuencia de la aplicación de una fuerza, en un modo activo (por puesta en tensión) o pasivo (respiración del paciente,...). Él evalúa por intermediario de sus manos, la rigidez de la estructura en pequeña deformación siguiendo distintos ejes y planos como lo hacen los físicos y biólogos con un módulo o una célula. Consecuencia de la curva de carga en J: En tracción, cuanto más débil es la fuerza inicial (s), tanto más perceptible será la deformación (e) (fig.6). En compresión, los resultados experimentales sobre módulos muestran al contrario que la rigidez disminuye con la deformación [49]. ¿Será lo mismo sobre los tejidos y estructuras vivas? La cuestión necesita documentación más amplia. Una estructura de tenseguridad se deforma sin intervención de punto de apoyo o de palanca i.e. de momento de fuerza. La evolución del sistema no puede ser descrita con relación a un referencial solidario del sistema. En tal caso las nociones de ejes y pivotes deben ser utilizadas con prudencia y consideradas como aproximaciones, quizás útiles para el profesor, pero muy lejos de una realidad mucho más sutil. En el mismo espíritu, los modelos de tenseguridad: módulos poliédricos, rueda de rayos, esferas geodésicas, grillas, mástiles y tubos de tenseguridad, pueden revelarse muy útiles para el desarrollo de la palpación del estudiante o del profesional. Éste utiliza muy a menudo el término de “flotación” para describir la movilidad de tal o cuál hueso u órgano.

Consecuencia del comportamiento neumático de los sistemas: Durante un test o una maniobra correctora, la aplicación de una señal mecánica en un eje o un plano dados, está al origen de una repartición de los esfuerzos según un proceso omnidireccional. (fig 5). Pensamos por ejemplo en la técnica llamada del “V-spread”, aplicada a las estructuras craneales [30], y a las correcciones por “dirección de energía” descritas por Upledger [45].

El raquis se comporta como un apilamiento de vértebras sometido a la gravedad como consecuencia del fracaso de las fascias

Los sistemas de tensegridad funcionan independientemente de la pesadez. En situación fisiológica cuando funciona como un mástil de tensegridad, el raquis no puede comportarse como *“un conjunto inestable de huesos que siempre tiende a derrumbarse desde el primero hasta el último día de nuestra vida”* (Frayette [10]). Aparece entonces que el rol de la gravedad como factor etiológico primario de patologías raquídeas merece ser reevaluado. Para Ingber [18], la gravedad representa un factor que refuerza el automodelado de un sistema biológico es decir, según nosotros, más bien favorable a la transferencia de los esfuerzos vía los tejidos blandos. Para Levin [26], es por consecuencia de la falla de las fascias que el raquis se comporta como un apilamiento de vértebras sometido a la gravedad; la transferencia de fuerzas se efectúa pues directamente de hueso a hueso. Es solamente por pérdida de su calidad de tensegridad que el sistema se “somete” a la pesadez. Ésta se vuelve entonces un factor de agravación⁴.

El auto modelado (o premodelado) representa la propiedad central de la tensegridad. Siguiendo la imagen del análisis de los ingenieros conceptores y de los biomecánicos, el funcionamiento de un organismo vivo puede describirse en términos de estados de auto modelado. Cuidado, éste enfoque basado en el estudio de los esfuerzos (tensión o compresión) “sobrepasa” el nivel de las estructuras; ciertos estados pueden solicitar elementos muy alejados unos de otros. Coexisten pues en el seno del organismo, una multitud de estados de auto modelado que se califican a su nivel de organización, como elementales; su asociación forma estados combinados. La fisiología corresponde a un equilibrio entre estos estados en el seno de un nivel de organización y a través de la organización jerárquica. Toda variación excesiva del nivel de auto modelado de estos estados igual que toda combinación inadecuada conducen a una ruptura de la continuidad de tensión, preludio de la patología.

A la escala macroscópica el ligamento parece desempeñar un papel fundamental porque soporta, fueran cuales fueran las configuraciones geométricas, la continuidad de tensión. El tejido motor en el sentido estricto (las células musculares) no hace sino “enchufarse” para regular su tensión sobre grandes estructuras faciales – los tabiques intra – e intermusculares prolongadas por los tendones – ligamentos activos de alcance más amplio en cierta forma. Las contracturas musculares que acompañan numerosas patologías del raquis podrían corresponder a una reacción normal del músculo tendiendo a mantener a cualquier precio el auto modelado, el factor etiológico local determinante siendo efectivamente una deficiencia ligamentaria.

La tensegridad principio mecánico, no introduce ni excluye ninguna técnica. Todas tienden a restituir lo óptimo para las capacidades de deformación de una estructura (movimientos menores). El osteópata modifica así en forma directa o indirecta, los estados de auto modelado para recuperar la continuidad de tensión.

Las fascias vía de acceso a la célula

El concepto de tejido matricial de tensegridad, desarrollado a propósito de la célula se encuentra también en la escala macroscópica, la red de las fascias – matriz extracelular⁵ – materializando este tejido matricial. Apoyándose sobre la noción de jerarquía el aparece como un meta nivel, cruzando, unificando y regulando mecánicamente el conjunto de los niveles jerárquicos. Para el osteópata la red facial se vuelve una vía de acceso a los procesos que relacionan las señales mecánicas de las membranas a los fenómenos bioquímicos, dicho de otra manera la mecano transducción. La célula representa, por eso, el blanco biológico último del gesto osteopático.

El Movimiento Respiratorio Primario relacionado a las oscilaciones de los sistemas

El MRP precedentemente examinado a la luz de la tensegridad por Cummings y Lee [5, 23, 24], podría corresponder a una deformación cíclica del cuerpo en su conjunto, oscilación resultando de miles de vibraciones propias de cada sistema subyacente: moleculares (ADN, proteínas, ...) infracelulares, celulares, tisulares, etc... Para Cummings, el MRP resultaría de las interacciones entre dos "sistemas" de tensegridad, el paciente y el osteópata [5].

Un sistema de tensegridad se declina según tres componentes físicos. Un nivel estructural, material, formado por elementos constitutivos, un nivel de energía interna potencial relacionada a los estados de auto modelado y un nivel vibratorio expresándose por la (las)

4- Más ampliamente, llamamos la atención del lector sobre los hechos siguientes. Por una parte, sin noción de campo gravitacional, la idea misma de verticalidad y por consecuencia, la de tono postural, desaparecen. Por otra parte, sobre la Tierra, las formas vivas se desarrollaron en el campo gravitacional. Atribuir un rol etiológico primario a la gravedad equivale pues a constatar el fracaso de la naturaleza para generar formas viables lo cual muestra una incomprensión o una negación del pensamiento de Still quién reconoce en el hombre la obra perfecta de la Naturaleza. [42].

5- La apelación de tejido conjuntivo que tiende a desaparecer del vocabulario histológico, caracteriza los tejidos particularmente ricos en matriz extracelular.

frecuencia (s) propia (s) del sistema. Esta tripartición se superpone a la visión del cuerpo de Still, considerada bajo los tres conceptos de materia, movimiento y espíritu [41].

Conclusión

La tensegridad cuyas características esenciales y aplicaciones en el campo celular hemos recordado, constituye un modelo biomecánico particularmente fecundo para la osteopatía. A nivel celular este modelo permite entender cómo la mecánica y la bioquímica son íntimamente relacionadas. Por medio de la organización jerárquica de las estructuras, el acto osteopático puede transmitirse hasta nivel celular. La importancia de las fascias ya notada por Still [43], está subrayada de nuevo: A nivel celular (membrana basal), más ampliamente como sistema de regulación mecánica (tejido matricial) y vía de acceso hacia las estructuras microscópicas.

Con la tensegridad se vuelven a discutir y se alumbran con una luz nueva algunos conceptos biomecánicos (noción de movimientos menores, de ejes y de pivotes), pedagógicos (modelos didácticos), técnicos (test y gestos terapéuticos) y etiológicos (papel de la gravedad, importancia del ligamento). La biomecánica "osteopática" se integra naturalmente en una biomecánica unitaria.

La tensegridad, concepto innovador, no integra todos los aspectos de la realidad biológica pero constituye un modelo arquitectónico y mecánico pertinente para los sistemas vivos.

Como lo subraya Ingber: *"para algunos, es una verdad evidente. Para otros, es una simplificación grosera de un funcionamiento tan complejo que está probablemente más allá de toda explicación"* [17]).

Para la osteopatía, la tensegridad es una doble oportunidad. Por una parte, ella vuelve a dar un lugar amplio a la mecánica, especificidad de la osteopatía, reencontrándose en eso con sus raíces. Por otra parte, ella permite asentar ciertos de sus conceptos sobre bases actualizadas, compartidas con la comunidad científica y así, instaurar un diálogo con arquitectos, ingenieros, anatomistas y biomecánicos.