

## MODELADO NUMÉRICO DE ESTRUCTURAS TENSEGRÍTICAS: CASO DE ESTUDIO

### NUMERICAL MODELING OF TENSEGRITY STRUCTURES: A CASE STUDY

Martín Morán<sup>a</sup>, José Muñoz<sup>a</sup>, Carlos A. Burgos<sup>a</sup>, Eduardo M. Sosa<sup>b</sup> y Rossana C. Jaca<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Universidad Nacional del Comahue, 8300 Neuquén, Argentina, [moran.martin.andres@gmail.com](mailto:moran.martin.andres@gmail.com), [josephmur05@yahoo.com.ar](mailto:josephmur05@yahoo.com.ar), [carlosburgoss@hotmail.com](mailto:carlosburgoss@hotmail.com), [rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar](mailto:rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar)*

<sup>b</sup> *Department of Mechanical, Materials, and Aerospace Engineering, West Virginia University, Morgantown, 26505, West Virginia, United States, [eduardo.sosa@mail.wvu.edu](mailto:eduardo.sosa@mail.wvu.edu)*

**Palabras clave:** Tensegridad, modelo físico, elementos finitos, no linealidad.

**Resumen.** Las estructuras tensegríticas están formadas por elementos comprimidos aislados dentro de una red de componentes traccionados, habitualmente cables, que conforman un sistema estructural estable. El comportamiento es altamente no lineal con grandes desplazamientos, incluso a niveles bajos de tensión. El objetivo del trabajo es analizar una tipología estructural diseñada bajo el concepto de Tensegridad, y su aplicación conceptual a una cubierta de un proyecto arquitectónico. Se construye un modelo físico a escala reducida para analizar el proceso constructivo, y un modelo numérico que reproduce la metodología de tensado para la comparación de ambos modelos. Las propiedades mecánicas del material de los tensores del modelo físico fueron obtenidas mediante ensayos uniaxiales de tensión. La simulación numérica se realiza por elementos finitos a través de un código de propósitos generales (ABAQUS) mediante análisis dinámico implícito, cuasi estático y considerando no linealidad geométrica. Se comparan los resultados experimentales y numéricos con el objeto de ajustar la metodología numérica. Para un estado de carga definido se obtuvo semejanza en la deformación global de ambos modelos. La comparación de los desplazamientos presenta una diferencia menor al 10% que se considera aceptable para la escala y propósitos de este trabajo.

**Keywords:** Tensegrity, physical model, finite elements, nonlinearity.

**Abstract.** Tensegrity structures are composed of isolated compressed elements within a network of tensioned components—typically cables—that form a stable structural system. Their behavior is highly nonlinear, with large displacements even under low stress levels. The objective of this work is to analyze a structural typology based on the tensegrity concept and its conceptual application to the roof of an architectural project. A scaled physical model is built to analyze the construction process, and a numerical model is developed to reproduce the tensioning methodology for comparison between both models. The mechanical properties of the tension elements in the physical model were obtained through experimental uniaxial tensile testing. The numerical simulation is carried out using the finite element method with general-purpose software (ABAQUS) through quasi-static implicit dynamic analysis, considering geometric nonlinearity. Experimental and numerical results are compared to calibrate the numerical methodology. For a defined load condition, both models showed similar global deformation. The comparison of displacements revealed a difference of less than 10%, which is considered acceptable given the scale and objectives of this study.

## 1 INTRODUCCIÓN

El concepto de tensegridad fue patentado en la década del sesenta por Buckminster Fuller, Snelson y Emmerich ([Micheletti and Podio-Guidugli, 2022](#)). Existe un consenso entre diferentes autores en definirlo como un sistema de elementos comprimidos y aislados entre sí (llamados elementos rígidos o puntales) y otros que sólo trabajan a tracción formando un continuo (descriptos como cables, cuerdas, cadenas, etc.), siendo éstos los únicos esfuerzos internos existentes en el sistema. Una característica diferenciante del resto de las estructuras es la continuidad de los elementos traccionados y que los elementos comprimidos están aislados entre sí, en la forma más pura del concepto de tensegridad. En la naturaleza, se puede destacar ejemplos de tensegridad en el sistema esquelético y muscular (huesos y tendones), la estructura de las telas de araña, la red membranal que une a los glóbulos rojos en la sangre, etc. En ingeniería existe una gran variedad de aplicaciones: cubiertas, pasarelas, plataformas, etc., y estructuras desplegadas, con diseños que parecen ir en contra del sentido común. Como ventajas del sistema se puede mencionar, elevada rigidez respecto a su peso propio, facilidad de transporte de las partes, capacidad de absorción de vibraciones disminuyendo la posibilidad de falla por fatiga en uniones y elementos. Como desventajas se pueden nombrar el alto grado de deformación, el requerimiento de mano de obra especializada para el montaje, y la necesidad de monitoreo periódico de tensiones en elementos traccionados en geometrías complejas.

Existen diferentes estructuras desarrolladas bajo este concepto que resultan de alto impacto estético, como el *Olympic Arena* (Seúl), el *Georgia Dome* (Atlanta), *The Crown Coliseum* (Carolina del Norte) ó *Kurilpa bridge* (Brisbane) ([Micheletti and Podio-Guidugli, 2022](#)). En Argentina, la tenso-estructura más importante es la cubierta del Estadio Único de La Plata, terminado en 2011. Esta estructura presenta la idea de unidad triangular con un módulo base generando una estructura más compleja formada por la yuxtaposición y fusión de dos anillos circulares de 85 m de diámetro, cuyos centros están separados por 48 m. El diseño considera un anillo de compresión en el borde exterior. El aspecto de diseño y cálculo de este tipo de estructura fue abordado por diferentes autores ([Lai, Y. et al., 2017](#); [Zhang and Feng, 2016](#)) pretendiendo definir estrategias de diseño eficientes y metodologías de análisis estructural adecuadas. Actualmente, no existen códigos de construcción ampliamente establecidos que regulen específicamente las estructuras de tensegridad. Su diseño y análisis se apoyan en principios consolidados de la ingeniería estructural, complementados ocasionalmente por normativas adaptadas, especialmente en lo referente a la deformación permisible. Como una aplicación parcial, o una guía de referencia para los tensores con cables de acero, se puede consultar la norma [ASTM A1023 \(2009\)](#).

El objetivo del presente trabajo es comprender el funcionamiento de una estructura tensegrítica, y su potencial aplicación en proyectos de ingeniería y arquitectura. Para ello se presenta el análisis de un modelo numérico y su contrastación con un modelo físico a escala reducida de un prototipo de estructura tensegrítica para cerramiento superior de grandes dimensiones. Se analiza la estructura con distintos pasos de pretensión, para un nivel de pretensión óptima (sin cargas externas), con el objeto de lograr una rigidez general del conjunto. Posteriormente se somete a un estado de carga externa comparando los resultados numéricos y experimentales para ajustar la metodología de análisis.

## 2 CASO DE ESTUDIO

Las estructuras tensegríticas permiten una variedad de diseños en cuanto a calidad estética, arquitectónica y eficiencia estructural. Dado que tienen peso propio reducido resultan ideales para estructuras de grandes luces. En relación con el diseño, se utilizan diversos enfoques computacionales para determinar configuraciones óptimas y modos de pretensado. Entre ellos

se destacan los métodos basados en codificación topológica o algoritmos genéticos (Lee, S. y Lee, J., 2016; Do et al., 2016).

La elección del caso de estudio parte de la idea de estudiar el comportamiento de un modelo a escala reducida, que sea susceptible de utilizarse en una cubierta para grandes luces. Para ello se tuvo en cuenta una disposición triangulada de cables radiales, idea original de Buckminster Fuller esquematizada en la Figura 1a. El modelo físico se desarrolla generando un diseño a partir de una unidad basada en un triángulo isósceles, cuyos lados iguales están sometidos a tracción, mientras que el lado restante está bajo compresión (Figura 1b). Si se repite adecuadamente esta unidad fundamental, se logra un sistema de elementos que están comprimidos y aislados entre sí y otros que sólo trabajan a tracción formando un continuo, siendo estos los únicos esfuerzos internos puros idealmente existentes en el sistema estructural.

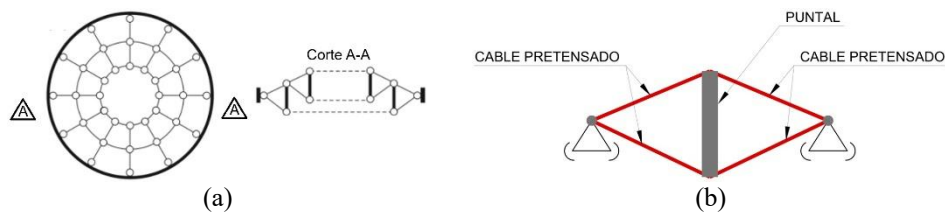


Figura 1. Cubierta tensegrítica. a) Esquema de tensegridad de doble capa para domo, b) Unidad elemental.

Existen muchos antecedentes de este tipo de estructuras materializadas principalmente en América del Norte. La Figura 2 muestra la estructura de *The Crown Coliseum* ubicado en la ciudad de Fayetteville, Carolina del Norte, EE. UU. La Figura 2a muestra un esquema de barras de la cubierta de techos, donde se observa la unidad fundamental vinculada a anillos perimetrales que permiten el tensado continuo de los cables y la compresión de los puntales aislados. La Figura 2b muestra una imagen de la estructura de la cubierta de techos en la etapa constructiva (sin la membrana). Una vista actual (2019), tomada luego del reemplazo de la membrana de la cubierta de techos, se observa en la Figura 2c. La estructura de *The Crown Coliseum* cubre una luz libre de 120m, fue diseñada por Geiger Engineers (1994).

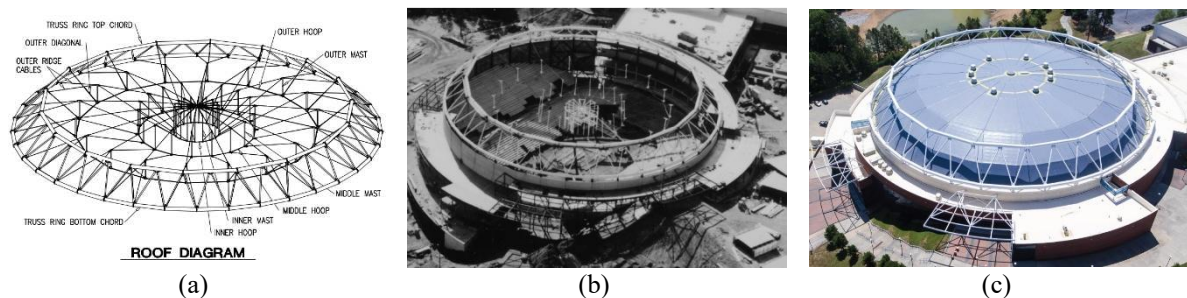


Figura 2. The Crown Coliseum (Geiger Engineers, 1994), a) Esquema de cubierta de techos, b) Etapa constructiva de la cubierta, (c) Vista aérea (2019), etapa de reemplazo de la membrana ([www.fibertite.com](http://www.fibertite.com))

### 3 MODELO FÍSICO

El modelo físico a escala reducida (escala 1:300) implementado en este estudio toma como referencia la tipología estructural de la cubierta de techos de *The Crown Coliseum*. El modelo permite analizar el comportamiento de una estructura tensegrítica y su potencial aplicación en proyectos de ingeniería y arquitectura.

Las figuras 3a, 3b y 3c, muestran el modelo físico en planta, vista 3D y corte (A-A). En cada uno de los esquemas se indican las dimensiones y se ubica la distribución de cables y puntales. Los puntales se materializaron con tubos circulares de aluminio de 9mm de diámetro, 1mm de espesor y un largo de 60mm. Los tensores se realizaron con un monofilamento de Nylon de

0.6mm de diámetro, con una resistencia a la tracción de 247.3N. La Figura 3d muestra una imagen del modelo terminado, donde se observa el anillo rígido inferior, construido con una mitad de llanta de acero de un automóvil que permite ubicar tuercas y tornillos de anclaje de monofilamentos para el tensado del modelo generando un vínculo móvil en sentido radial, mediante el ajuste de los tornillos (Figura 3f). En el puntal central (Figura 3e) se utiliza un elemento expansor que facilita el tensado del modelo. El borde externo de anillos octogonales presenta el primer grupo de puntales sometidos a compresión, que se unen en la parte superior e inferior a los tensores por medio de un orificio pasador de 1mm. La segunda línea de anillos traccionados se vincula al segundo grupo de puntales mediante el mismo sistema deslizante.

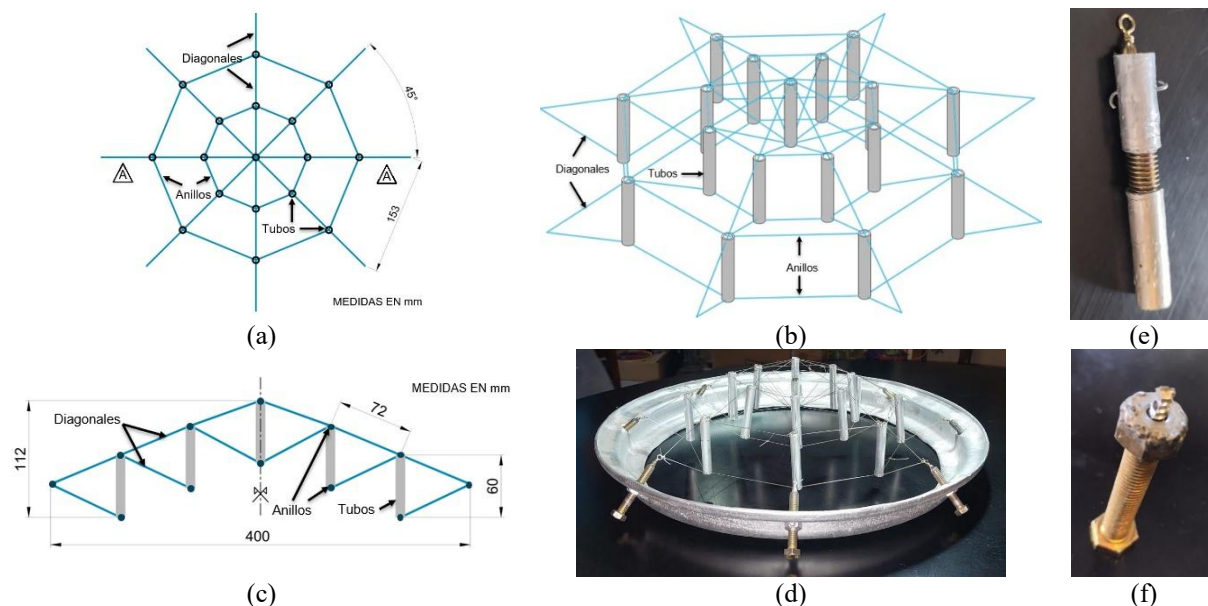


Figura 3. Modelo físico. a) Planta, b) Vista 3D, c) Corte A-A, d) Modelo completo, e) Puntal central, con dispositivo de expansión, f) Tornillos de anclaje de monofilamentos para el tensado por ajuste de los tornillos.

### 3.1 Construcción del modelo

Para el armado del modelo, inicialmente se montó la estructura en una sola etapa, desplegándola alrededor del anillo rígido y ajustando los apoyos giratorios radiales junto con la tensión de los anillos octogonales. Este procedimiento resultó difícil, debido a la necesidad de coordinar el tensado simultáneo de todos los elementos. Para solucionar esto, se optó por armar la estructura por etapas: en la primera etapa (1) se tensaron la primera y segunda línea de anillos octogonales controlando la tensión de las diagonales y verificando la verticalidad de los puntales. El tensado de una línea de anillos, provoca el destensado de la otra. En la segunda etapa (2) se regularon los tornillos ubicados en el anillo rígido (Figura 3f) para generar un desplazamiento radial para retensar los anillos y diagonales del modelo. Las etapas 1 y 2 se repitieron al menos dos veces hasta llegar al puntal central, donde mediante el dispositivo de expansión se reguló la tensión en las monofilamentos y luego se rectificó la tensión del modelo en los planos radiales (Figura 3c). Finalmente, en una tercera etapa (3) se aplicó la carga de prueba para ver el comportamiento del modelo físico.

Descripción	Material	Peso [g/mm]	Long. Total [mm]	Peso Total	
				[g]	[%]
Tubos	Aluminio	7.37E-02	1020	75.14	97%
Monofilamento	Nylon	3.26E-04	5955	1.94	3%
Longitud total del modelo [mm]			6975	77.08	100%

Tabla 1: Peso propio del modelo físico.



La [Tabla 1](#) computa el peso propio de los elementos sometidos a tracción y compresión del modelo físico. El peso total de ambos elementos es 77.08 g, el 3% corresponde a los sometidos a tracción y el 97% a los sometidos a compresión.

### 3.2 Caracterización de los materiales del modelo físico

La modelación de una estructura requiere adoptar los parámetros mecánicos de los elementos que componen la estructura a analizar. La [Figura 4](#) muestra algunos de los parámetros que caracterizan un monofilamento de Nylon y un tubo de aluminio de 9mm de diámetro, 1mm de espesor y 60mm de longitud, con un peso de 4.2g.



Figura 4. Materiales utilizados. a) Propiedades del monofilamento, b) Puntal con indicación de su peso.

Material	Aleación	Densidad [g/cm <sup>3</sup> ]	Módulo de elasticidad (E) [MPa]	Módulo de Poisson
Aluminio	3003-H14	2.7	70000	0.33
Nylon	6/6	1.15	4642	0.4

Tabla 2: Características mecánicas de los materiales utilizados en modelo físico.

La [Tabla 2](#) muestra los parámetros adoptados para el aluminio ([Kalpakjian y Schmid, 1984](#)) y para el monofilamento de Nylon. El módulo de Elasticidad (E) del monofilamento se determinó mediante un ensayo a tracción bajo las normas [ASTM D2256/D2256M \(2021\)](#). Estas normas definen el procedimiento para determinar las propiedades a tracción para mono y multifilamentos, abarcando la medición de la fuerza de rotura y la elongación del monofilamento y guía para el cálculo de la tenacidad de rotura, módulo tangente y módulo secante. La norma ofrece tres posibles configuraciones para ensayar la muestra: a) en forma recta b) en forma anudada c) en forma de bucle. La configuración elegida fue la forma a) en la que el monofilamento es amordazado en forma recta. La máquina de ensayo a tensión (Shimatzu EZ-LX, Kyoto, Japón) está equipada con dos tipos de mordazas: 1) Mordazas planas 2) Mordazas tipo cabrestante de tambor o amortiguación, identificadas como configuración C1 y C2. Se ensayaron tres muestras de cada grupo, como lo especifica la norma. En los gráficos tensión-deformación ([Figura 5](#)) se muestran las curvas de ambas configuraciones (C1) y (C2) y se representa la regresión lineal de los datos de ambas configuraciones. La configuración C1 considera el amordazamiento directo, evaluándose 7 especímenes, mientras que la configuración C2 evalúa 4 especímenes con amordazamiento directo más un lazo (*loop*) de 30mm de diámetro. La carga de rotura (CR) para la configuración C1 resultó de 200.1N con un desvío de 3.6N y de 212.6N(+/- 5.5N) para la configuración C2. El módulo de elasticidad (E) se estableció en 4642MPa para un rango de tensiones entre 0-150MPa, para la configuración C2, que representa adecuadamente las condiciones del modelo físico.

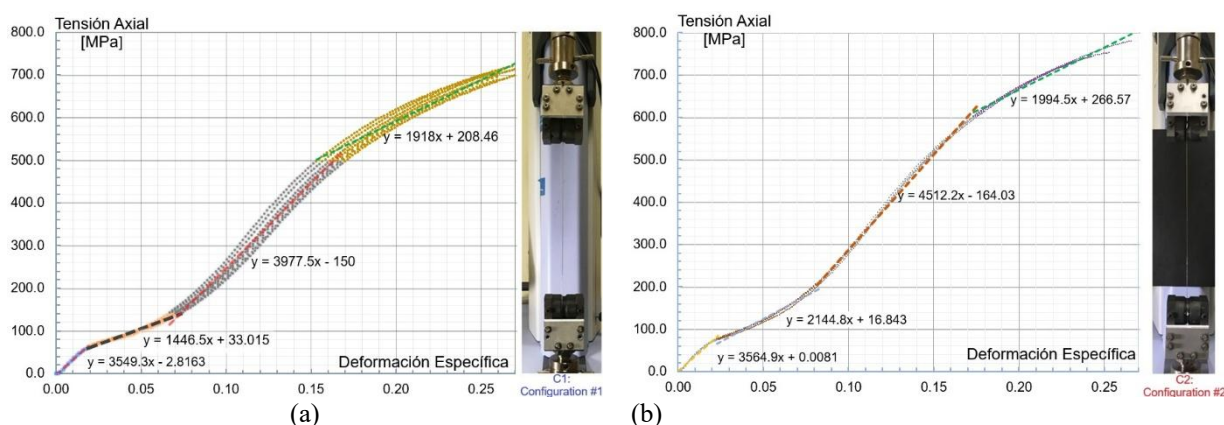


Figura 5. Gráficos Tensión-Deformación. a) Configuración C1. b) Configuración C2.

## 4 MODELO NUMÉRICO

La geometría presentada en la [Figura 3](#) se utiliza como base para la creación de un modelo de elementos finitos mediante Abaqus/CAE ([Abaqus, 2023](#)). La modelación se realiza usando elementos unidimensionales de tipo lineal de 2 nodos en el espacio tridimensional que trabajan a tracción y compresión, denominado T3D2. Se realizó un análisis de convergencia de la malla, lográndose un 0.01% de error con 369 elementos y 466 nodos, tomando como referencia el desplazamiento del nodo inferior del puntal central. En los puntos donde los cables se unen al anillo rígido se consideran desplazamientos nulos en la etapa inicial ( $U_1=U_2=U_3=0$ ) y posteriormente se impone un desplazamiento de 2.5mm en sentido radial hacia afuera para lograr el tensado de los cables. En el resto de los nodos del modelo se definen restricciones multi punto (*Multi-point constraints*, MPC) que permiten imponer restricciones entre diferentes grados de libertad del modelo. Se utilizan el tipo de MPC denominado PIN que proporciona una unión articulada entre dos nodos igualando los desplazamientos, pero dejando las rotaciones independientes entre sí. La [Figura 6a](#) muestra la malla de elementos y la [Figura 6b](#) detalla los nodos con desplazamiento nulo, el resto tienen restricciones de tipo MPC.

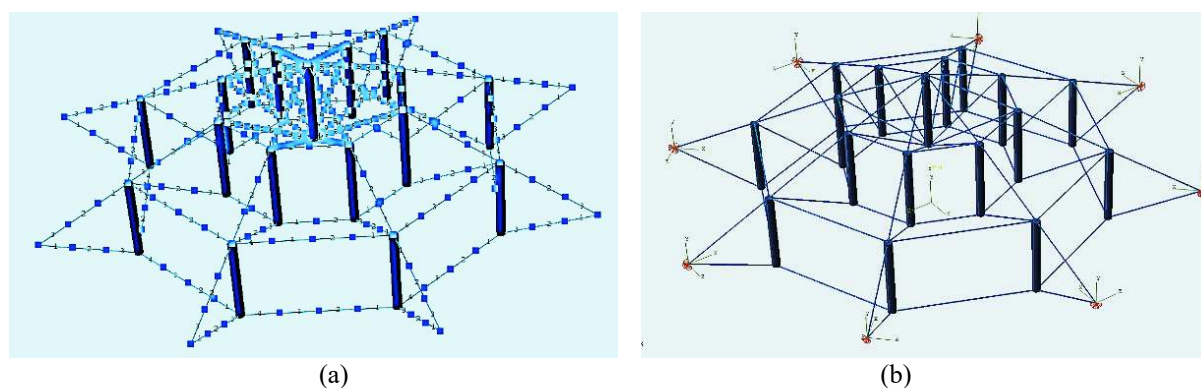


Figura 6. Modelo numérico (a) Detalle de nodos y elementos, (b) Restricciones de vínculo.

Las propiedades mecánicas usadas en el modelo son las mostradas en la [Tabla 2](#). En la simulación no se permite que el material de los tensores tome carga en compresión activando la opción de *No compression* disponible en Abaqus.

### 4.1 Análisis de tensiones y deformaciones

En estas estructuras, la estabilidad se logra mediante el control preciso del pretensado en cables y los elementos que resultan comprimidos, y es fundamental considerar la no linealidad geométrica debido a la alta flexibilidad del sistema. Trabajos previos ([Allen, 2018](#); [Shashank](#)

et al., 2016) han realizado estudios numéricos orientados a sentar bases para el análisis de esta tipología estructural. Para este trabajo se utiliza un análisis dinámico implícito cuasi estático para definir la configuración geométrica de equilibrio inicial, con pretensado como condición inicial y el tensado mediante desplazamientos impuestos, y la posterior respuesta a la carga aplicada. En esta metodología se considera la evolución temporal de la estructura y sus propiedades, pero las fuerzas inerciales pueden ser despreciadas ya que son pequeñas en comparación con las fuerzas que causan la deformación de la estructura. Esto permite que la estructura se comporte como en un análisis estático a pesar de estar modelado dinámicamente. El método de Newton-Raphson se utiliza para hallar las fuerzas de equilibrio en cada paso temporal, mediante un esquema incremental e iterativo. Considera las fuerzas internas sólo debido a deformaciones.

Abaqus permite plantear simulaciones en “pasos” o “steps”, generados de manera secuencial. El estado de la estructura al final de un paso provee las condiciones iniciales para el próximo paso del análisis. Esta simulación se realiza en tres pasos mostrados en la Figura 7: **Paso 1:** Pretensión en los anillos externos e internos  $T_1=10\text{MPa}$  en los inferiores y  $T_2=25\text{MPa}$  en los superiores; y pretensión en las diagonales que convergen al puntal central ( $T_1$  en diagonal inferiores y  $T_2$  en diagonal superior), como se muestra en la Figura 7a.

**Paso 2:** Desplazamiento de los apoyos en dirección radial horizontal alejándose del centro del anillo exterior donde están los apoyos (2.5mm a  $0^\circ$ ), tal como se presenta en la Figura 7b.

**Paso 3:** Aplicación de la carga de 20N en el nudo inferior del puntal central (Figura 7c).

Esta secuencia realizada en la simulación intenta seguir el proceso constructivo del modelo físico y la aplicación del estado de carga. En la Figura 8 se muestra el estado de tensiones obtenido al final de cada etapa.

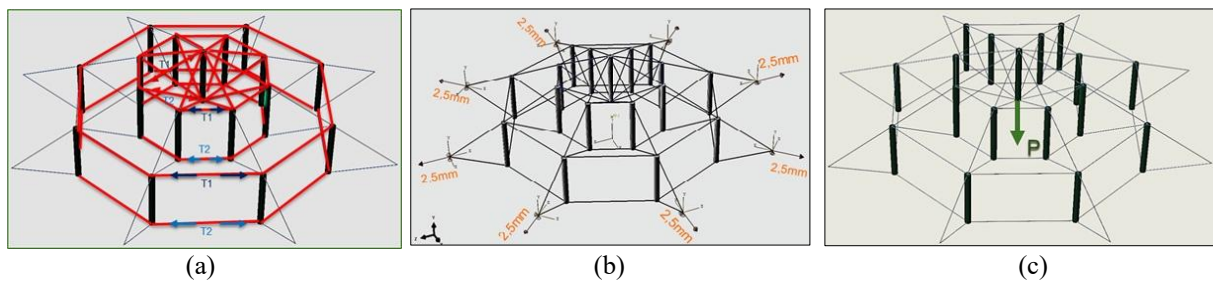


Figura 7. Etapas de análisis: (a) Paso 1: tensiones iniciales, (b) Paso 2: desplazamientos impuestos, (c) Paso 3: carga aplicada.

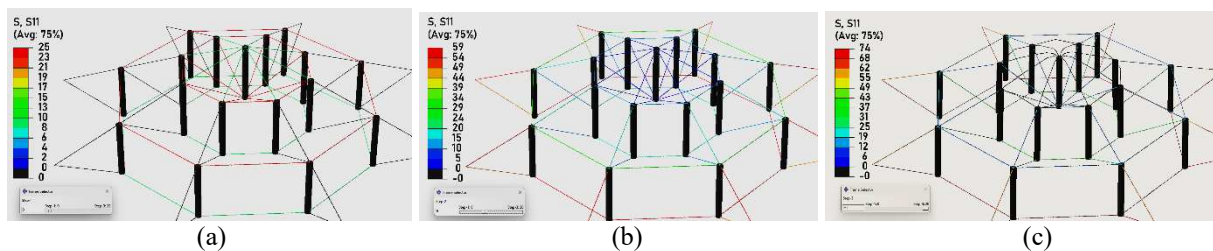


Figura 8. Tensiones axiales en tensores: (a) Paso 1, (b) Paso 2, (c) Paso 3.

En el modelo físico surge la dificultad de evaluar las tensiones en los tensores necesarias para llevar la estructura a la condición de estado inicial, previo a la aplicación del estado de carga (Paso 3). El proceso de armado comienza con el tensado de los anillos superior e inferior externos, conformando una estructura autoportante. Posteriormente, se procede al tensado de los anillos ubicados hacia el centro de la estructura.

Esta misma estrategia fue implementada en el modelo numérico durante el Paso 1, definiendo como estado inicial las tensiones  $T_1$  y  $T_2$  (Figura 8a). Dichos valores se

seleccionaron de manera que los desplazamientos nodales obtenidos fueran compatibles con los observados en el modelo físico. La [Tabla 3](#) presenta la evolución de las tensiones a lo largo de las diferentes etapas de armado y carga de la estructura. Las tensiones señaladas como “pretensión” corresponden a las tensiones iniciales  $T_1$  y  $T_2$ , a las que se añadieron las tensiones en las diagonales que convergen en el puntal central. Los valores de la [Tabla 3](#) reflejan las tensiones alcanzadas al final de cada paso, tras el correspondiente proceso de deformación.

Al finalizar el Paso 1, se observa que en las diagonales entre los apoyos y los anillos superior e inferior externos aparecen tensiones, mientras que los anillos externos e internos presentan, en general, una reducción respecto a la pretensión inicial. En el paso siguiente, la aplicación de desplazamientos radiales en los apoyos genera un incremento de tensiones en todos los cables ([Figura 8b](#)), llevando a la estructura a su configuración de equilibrio inicial, condición necesaria para aplicar la carga externa en el puntal central ([Figura 8c](#)).

Etapas	Tensiones axiales en Diagonales [MPa]						Tensiones axiales en Anillos [MPa]			
	Externo		Interno		Central		Externo		Interno	
	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
Pretensión	0	0	0	0	25	10	25	10	25	10
Paso 1	10.45	9.44	0.00	0.00	0.00	0.00	12.50	11.23	0.00	0.00
Paso 2	58.82	48.72	17.07	14.76	5.68	3.99	31.97	58.37	8.78	17.37
Paso 3	57.86	61.63	15.86	30.08	0.00	16.77	14.44	73.84	0.00	35.39

Tabla 3: Tensiones axiales [MPa] en cables en pretensado inicial y al final de cada paso (Pasos 1, 2 y 3).

Resulta relevante analizar la evolución de los desplazamientos nodales. En la [Figura 9](#) se muestra el desplazamiento del nodo inferior del puntal central donde se aplica la carga, identificando los valores hallados en cada etapa del cálculo. En el análisis dinámico cuasi estático, el tiempo ( $t$ ) no representa la velocidad real del proceso, sino que indica la progresión de la carga en el modelo para obtener una respuesta equivalente a la de un análisis estático, pero con la consideración de la dinámica estructural. El desplazamiento vertical ( $w$ ) se considera positivo cuando se dirige hacia abajo. Al finalizar el Paso 1 se alcanza un valor de  $w = 0.87\text{mm}$ . Posteriormente, los desplazamientos impuestos en el Paso 2 generan inicialmente una reducción ( $w = 0.37\text{mm}$ ), seguida de un incremento progresivo hasta alcanzar  $w = 1.78\text{mm}$ , valor que se adopta como la condición de equilibrio inicial para la aplicación de la carga.

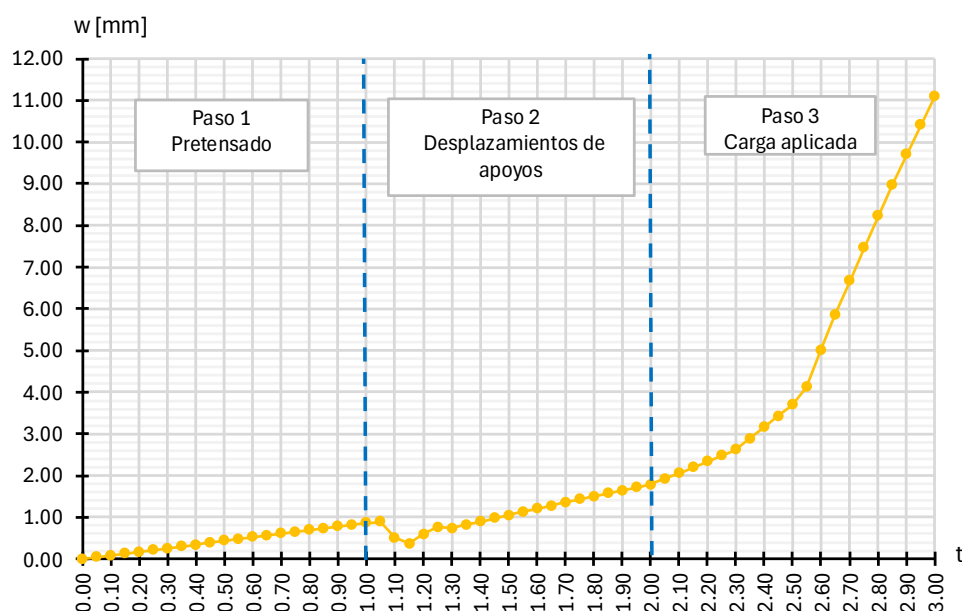


Figura 9. Desplazamiento vertical del nodo inferior del puntal central.



## 4.2 Comparación de resultados numéricos y experimentales

La aplicación de la carga de 20N en el modelo físico produjo un descenso  $w = 8.7\text{mm}$  en el extremo inferior del puntal central, con una deformada como la mostrada en la Figura 10a. Ese valor fue medido tomando como base la condición de equilibrio inicial previa a la aplicación de la carga. Se usó un soporte fijo exterior de madera de sección circular (diámetro 5mm) por encima del modelo, desde donde se midió con calibre la posición del nodo inferior del puntal central, antes y después de la aplicación de la carga. El modelo numérico muestra una deformada similar con un desplazamiento  $w = 11.10\text{mm}$  al final del Paso 3 (Figura 10b).

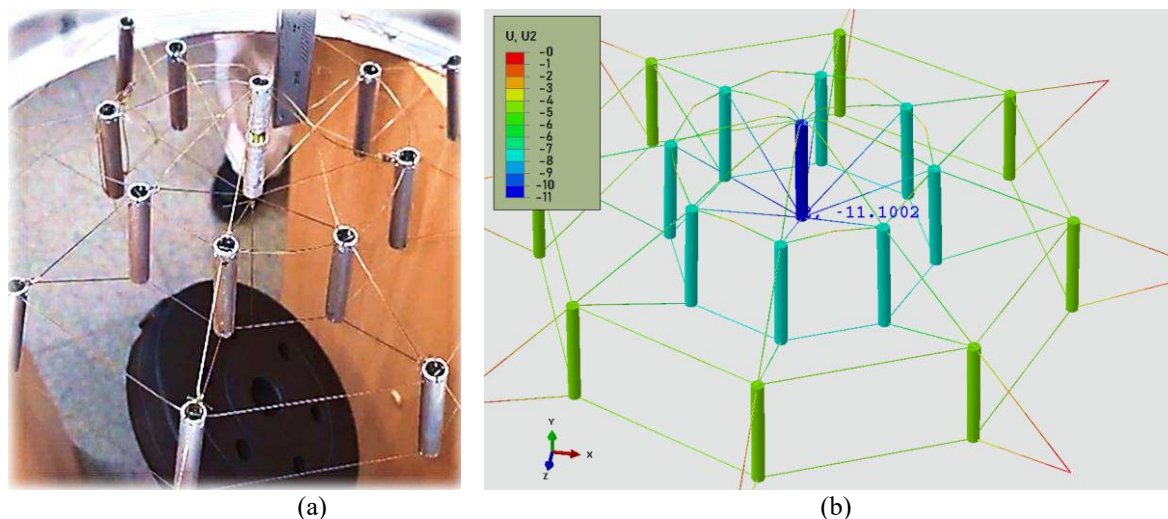


Figura 10. Deformada de la estructura: (a) Modelo físico, (b) Modelo numérico.

La comparación con el modelo físico requiere que se calcule la diferencia respecto al descenso obtenido al final del Paso 2, de valor 1.78mm. El desplazamiento neto es:  $w = 9.32\text{mm}$ , este valor presenta una diferencia de 0.62mm con respecto al valor medido en el modelo representando un error porcentual de 7.1%. Dado que el propósito del análisis es predecir la respuesta del modelo físico sometido a la carga externa aplicada, el error porcentual obtenido de la comparación se considera aceptable.

## 5 CONCLUSIONES

En este trabajo se plantea la modelación numérica de una estructura tensegrítica orientada a su aplicación en cubiertas de grandes dimensiones. Con el fin de establecer una metodología numérica adecuada, se construyó un modelo físico a escala reducida sobre el cual se aplicó una carga concentrada en un punto específico. En la modelación numérica se implementó un análisis dinámico implícito y cuasi estático, incorporando no linealidad geométrica. Asimismo, en el caso de los tensores, se consideró la condición de no admitir esfuerzos de compresión. La respuesta experimental obtenida a partir del modelo físico permitió validar la metodología numérica propuesta.

La construcción del modelo físico evidenció la necesidad de definir una secuencia de armado precisa, garantizando en cada etapa el control de la tensión en los elementos a tensar (anillos y diagonales). En este estudio, la estrategia adoptada consistió en imponer tensiones progresivas en los anillos desde el exterior hacia el centro, observándose que cada etapa de tensado tendía a reducir la tensión previamente alcanzada en los cables de las etapas anteriores.

La metodología implementada en la simulación numérica permitió representar el comportamiento del modelo físico durante el proceso de armado y carga de la estructura. Los aspectos numéricos más relevantes en la simulación resultaron: el uso de elementos

unidimensionales lineales tipo *Truss* (tracción-compresión para los tubos de aluminio, y sólo tracción para los tensores), no-linealidad geométrica (grandes desplazamientos y deformaciones), anillos y diagonales vinculados en desplazamientos, pero con las rotaciones libres, así como la simulación en múltiples etapas, incluyendo una fase inicial de pretensión y el desplazamiento impuesto en los apoyos.

Los resultados obtenidos permiten concluir que se alcanzó una adecuada correspondencia en la deformación global de ambos modelos bajo la carga aplicada. En particular, los desplazamientos registrados en el puntal central presentaron una diferencia máxima del 7.1 % entre el modelo físico y el numérico, valor considerado aceptable en relación con la escala y los objetivos de este estudio.

Finalmente, este trabajo constituye un aporte metodológico al análisis de estructuras de tensegridad, al establecer las etapas y procedimientos necesarios para modelar con precisión sus elementos y conexiones. Como proyección futura, se plantea aplicar esta metodología al estudio de una estructura tensegrítica diseñada para una cubierta específica, sometida a diferentes escenarios de carga. Dado que la pretensión inicial influye en la respuesta estructural de los cables, en futuros trabajos se intentará un análisis de sensibilidad paramétrica para evaluar su efecto en la respuesta estructural global.

**Agradecimientos.** Los autores agradecen a SECYT-UNCo. Los ensayos de material se realizaron en el Departamento de Ingeniería Mecánica, Materiales y Aeroespacial de West Virginia University. La contribución del Dr. Eduardo M. Sosa a este estudio se originó durante su estancia en la UNCo como parte del *Fullbright Specialist Program*, patrocinado por el Departamento de Estado de EE.UU., y completada en marzo de 2024.

## REFERENCIAS

- Allen, K.M., Analysis of Tensegrity Structures Using Abaqus. *Honors College Theses*. 553, 2018. <https://digitalcommons.georgiasouthern.edu/honors-theses/553>.
- ASTM A1023. *Standard Specification for Carbon Steel Wire Ropes for General Purposes*, ASTM International, 2009.
- ASTM D2256/D2256M, *Standard Test Method for Tensile Properties of Yarns by the Single-Strand Method*, ASTM International, 2021. [https://doi.org/10.1520/D2256\\_D2256M-15](https://doi.org/10.1520/D2256_D2256M-15)
- Do, D.T., Lee, S. and Lee, J. A Modified Differential Evolution Algorithm for Tensegrity Structures. *Composite Structures*, 158: 11–19, 2016.
- Geiger Engineers. Malla de Aspersión de The Crown Coliseum. Fayetteville, 1994. (<https://www.fibertite.com/project-profiles/coliseum-gets-new-fibertite-crown>)
- Kalpakjian, S. y Schmid, S., *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, Ed. 7. Pearson, 1984.
- Lai, Y., Zhang, Y.J., Liu, L., Wei, X., Fang, E. and Lua, J., Integrating CAD with Abaqus: A Practical Isogeometric Analysis Software Platform for Industrial Applications. *Computers & Mathematics with Applications*, 74(7): 1648–1660, 2017.
- Lee, S. and Lee, J., A Novel Method for Topology Design of Tensegrity Structures. *Composite Structures*, 152: 11–19, 2016, DOI: [10.1016/j.compstruct.2016.05.009](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.009)
- Micheletti, A and Podio-Guidugli, P., Seventy years of tensegrities (and counting). *Applied Mechanics*, 92: 2525–2548, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00419-022-02192-4>.
- Shashank, J., Narula, S. and Garg, S., Analysis of Tensegrity Tower using Staad Pro. *International Journal of Science, Engineering and Technology*, 4(4): 591-613, 2016.
- Simulia/Abaqus. Abaqus User's Manual, Versión 2023. Dassault Systèmes, Providence, RI; 2023.
- Zhang, P. and Feng, F., Initial prestress design and optimization of tensegrity systems based on symmetry and stiffness. *Int. J. Solids Struct.*, 106-107: 68-90, 2016.