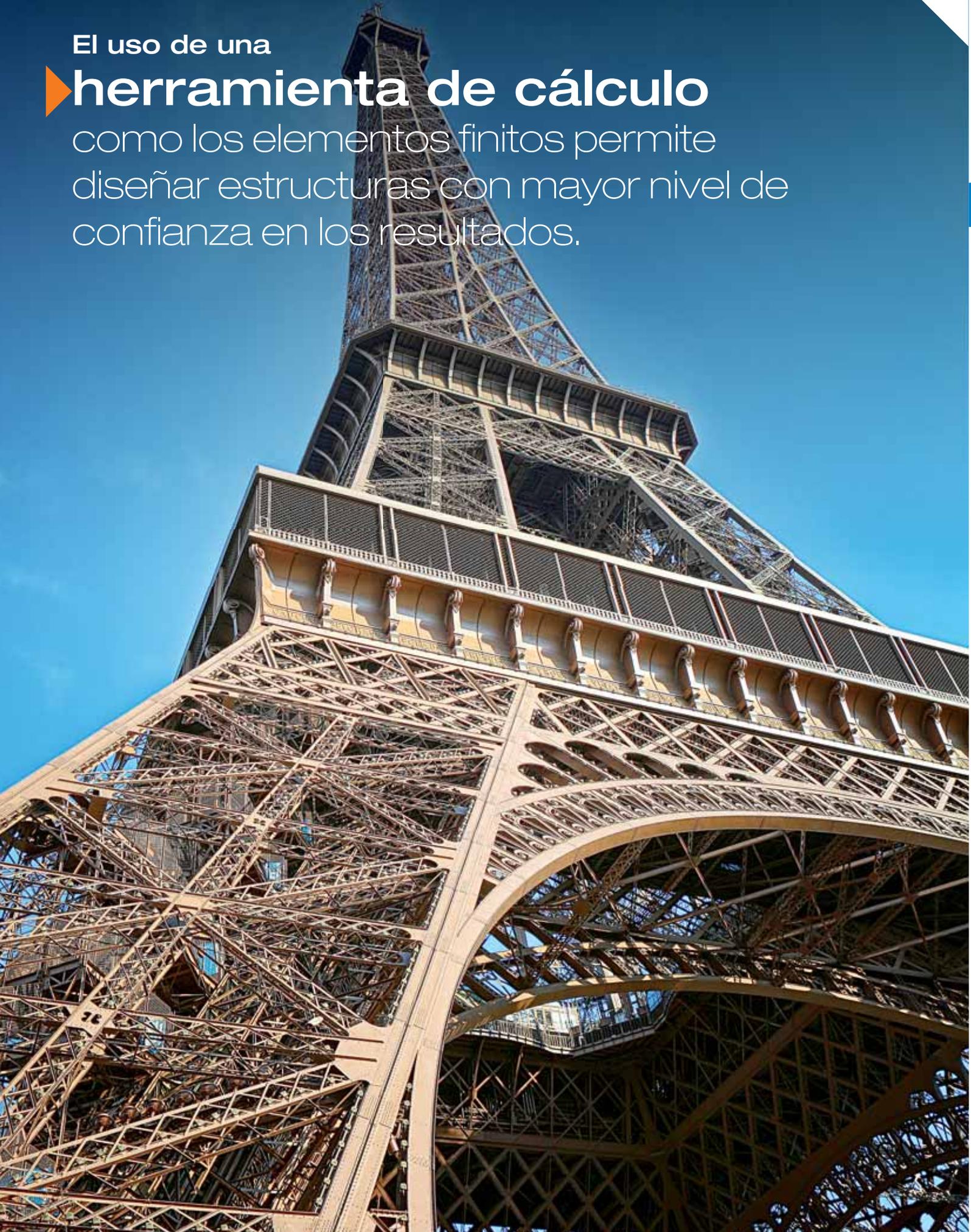


El uso de una

## herramienta de cálculo

como los elementos finitos permite diseñar estructuras con mayor nivel de confianza en los resultados.



# Cálculo y diseño estructural sometido a carga de viento de un colector parabólico solar (ANSYS R15.0)

## *Structural Calculation Subjected to Wind Load of a Solar Parabolic Collector (ANSYS R15.0)*

### RESUMEN

El presente artículo brinda los resultados de una investigación acerca de la carga estructural ocasionada por el viento de un colector parabólico solar. El cálculo del diseño y dimensionamiento fue obtenido en una versión anterior y publicada en el artículo "Cálculo y diseño de un colector parabólico para la generación de vapor utilizando energía solar".

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido gran importancia en la solución de problemas de ingeniería que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Actualmente, existen diferentes programas de simulación en el campo estructural, tanto de ingeniería asistida por computadora (CAE) como de diseño (CAD), en el caso de los CAE, el programa ANSYS permite solucionar casos de carga estructural y muestra, de manera visual, dónde se genera más esfuerzo y mayor deformación. En este estudio, dibujamos y simulamos un colector parabólico sometido a una carga alta de viento, ya que dicha estructura estaría ubicada en la parte superior de una construcción donde ocurren fuertes ráfagas de viento. El objetivo de la investigación es demostrar que no existe riesgo de colapso estructural del diseño, para lo que se hizo una simulación del proceso antes de ser puesto a prueba.

### ABSTRACT

*This article provides the results of the structural loads caused by the wind of a solar parabolic trough, the calculation of the design and sizing was obtained in an earlier version with the item name "Calculation and Design Parabolic collector for Steam Generation Using Solar Energy".*

*The finite element method (FEM) has become very important as alternative to the solution of engineering problems that until recently were virtually impossible to solve by conventional mathematical methods. Currently we have different simulation programs in the structural field, the Computer-Aided Engineering (CAE) and the Computer-Aided Design (CAD). ANSYS program (a CAE software) offers solutions for structural load problems and displaying visually where high effort and greater deformation are generated. For this study, we draw and simulate a parabolic collector under high wind load conditions, since that system would be located on the top of a building where these conditions exist. The aim of the research is show that there is no risk of structural collapse for the design, running a simulation before being tested.*



### Palabras Claves

Colector Parabólico, Energía Solar, Elementos Finitos, Diseño Estructural.

### Key words

Parabolic Collector, Solar Energy, Finite Element, Structural Design.

## INTRODUCCIÓN

El cálculo estructural incluye una amplia variedad de procedimientos y técnicas bastante elaboradas, que integran matemáticas y física para generar procesos con el fin de encontrar resultados muchas veces abstractos y complejos de interpretar. Antes, el cálculo de una estructura compleja (figura 1) obviaba muchas variables, lo que no permitía resolver todos los problemas al momento de ponerlo a prueba.

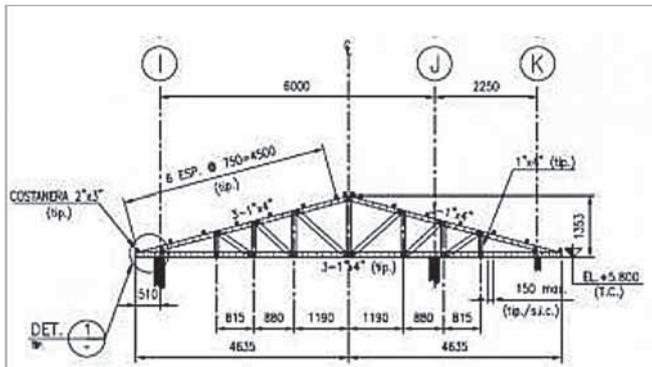


Figura 1: Estructura sometida a cargas puntuales.

Para llevar a cabo la investigación del cálculo estructural de un colector parabólico solar por carga de viento, decidimos aplicar metodologías de resistencia de materiales y diseño de elementos, con vigas colocadas en una base móvil, para definir el peso de la estructura y las reacciones que se generan.

Mediante el uso de una metodología analítica, concluimos que la mayor carga de esfuerzos tenía que ser dada por el viento, que en circunstancias extremas alcanza velocidades de hasta 40 km/h en la ciudad. Dicha solución nos brindaba resultados no acordes con el grado de complejidad de nuestra estructura, por lo que decidimos utilizar un software CAE (ANSYS R15.0). Este genera nodos y elementos (desintegrar la estructura en partes pequeñas) que facilitan obtener resultados que den una idea de su grado de convergencia con el sistema real.

## FUNDAMENTOS

### El método de elementos finitos:

El MEF permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo a escala. Sin embargo no deja de ser un método aproximativo de cálculo debido a sus hipótesis básicas subyacentes. Por ello, los prototipos siguen siendo necesarios, aunque en menor número, ya que el modelo puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo, en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos.

Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo, regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), determinado por

una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número finito de grados de libertad cuyo comportamiento es modelado por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

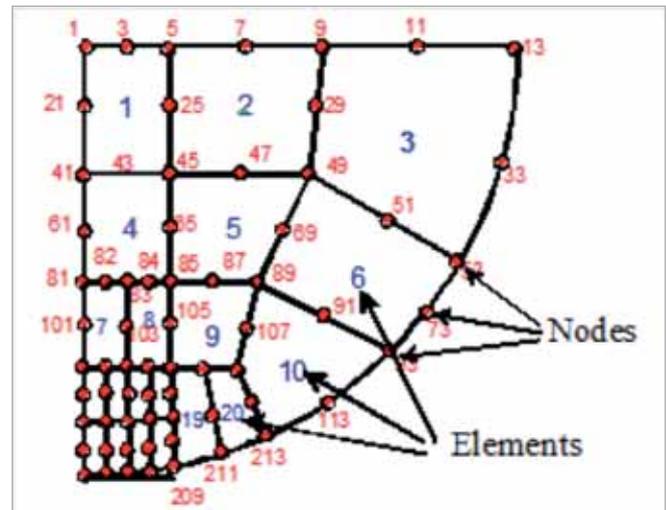


Figura 2: Generación de nodos y elementos en un plano estructural

### Deformación elástica y plástica ( $\Delta \ell$ ):

Cuando una pieza se somete a una fuerza de tensión uniaxial, se produce una deformación del material. Si este vuelve a sus dimensiones originales cuando la fuerza cesa, se dice que el material ha sufrido una deformación elástica.

Si el material es deformado hasta el punto que los átomos no pueden recuperar sus posiciones originales, se afirma que ha experimentado una deformación plástica. Al respecto, la ley de Hooke especifica:

$$k = \frac{F}{\Delta \ell}, \text{ sus unidades son } \frac{N}{m}$$

Donde k es la constante de deformación plástica, F la fuerza aplicada (N) y  $\Delta \ell$  la variación de longitud (m).

### Esfuerzo y deformación unitaria:

Por definición, el esfuerzo S en una barra es igual al cociente entre la fuerza de tensión uniaxial media F y la sección transversal original  $A_0$  de la barra.

$$S = \frac{F}{A_0}, \text{ sus unidades son } \frac{N}{m^2}$$

Por otro lado, la deformación unitaria originada por la acción de una fuerza de tensión uniaxial sobre una muestra es el cociente entre el cambio de longitud de la muestra en la dirección de la fuerza y la longitud original.

$$\delta = \frac{\ell - \ell_0}{\ell} = \frac{\Delta \ell}{\ell}$$

### Tensión de Von Mises:

El criterio de máxima tensión de Von Mises se basa en la teoría de Von Mises-Hencky, también conocida como teoría de la energía de cortadura o teoría de la energía de distorsión máxima.

Nuestra intención es calcular la deformación y el esfuerzo máximo de Von Mises, y en qué puntos se aplican, para determinar si nuestra estructura aguantaría una carga alta de viento y tomar las medidas necesarias, en caso de tener un diseño que no resista los esfuerzos y deformaciones propias de la simulación.

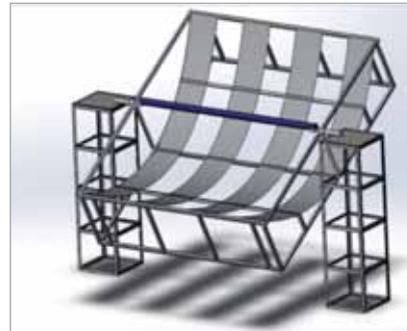
**Fuerza de arrastre:**

La fuerza de arrastre para cualquier perfil está dada por la ecuación

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 C_D A_D$$

Donde V (m/s) es la velocidad del fluido.  $C_D$  es el coeficiente de arrastre y  $A_D$  (m<sup>2</sup>) el área de contacto con el viento, despejando la ecuación obtenemos la expresión de presión aplicada, que sería la división de fuerza ( $F_D$ ) entre el área ( $A_D$ ).

Con estos resultados se procedió a dibujar el colector parabólico 3D en el programa SolidWork 2012 (versión educativa bajo la licencia de Tecsup-Sur).



**Figura 4:** Estructura y montaje de colector parabólico.

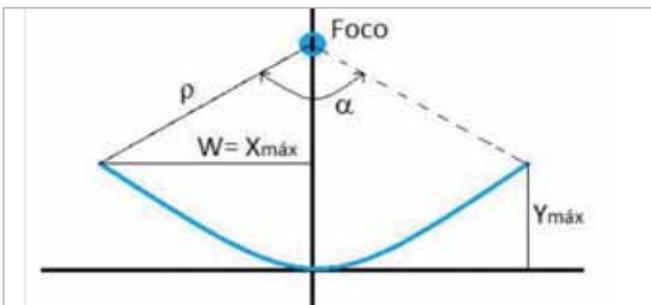
Luego se exportó la geometría al software de simulación ANSYS R15.0 (versión académica, bajo licencia Tecsup-Sur).

**METODOLOGÍA**

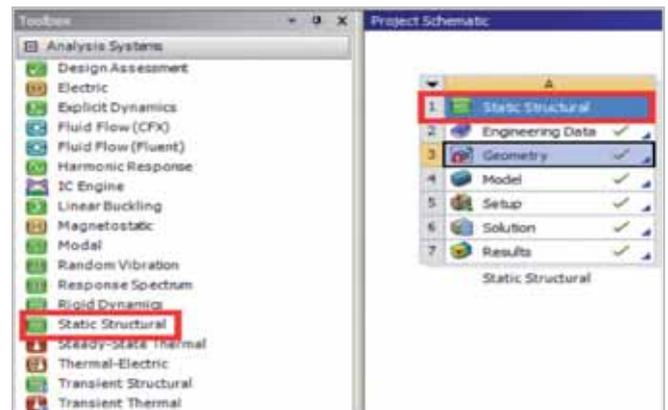
**Dibujo y diseño del colector parabólico**

Los resultados obtenidos del diseño:

- F=0.55m (longitud de foco de parábola a la base)
- W=1.071m ( $X_{m\acute{a}x}$  de la parábola)
- A=88.47° (Angulo alfa)
- L=1.8m (longitud real del tubo)
- D=2.256 cm (diámetro real del tubo)



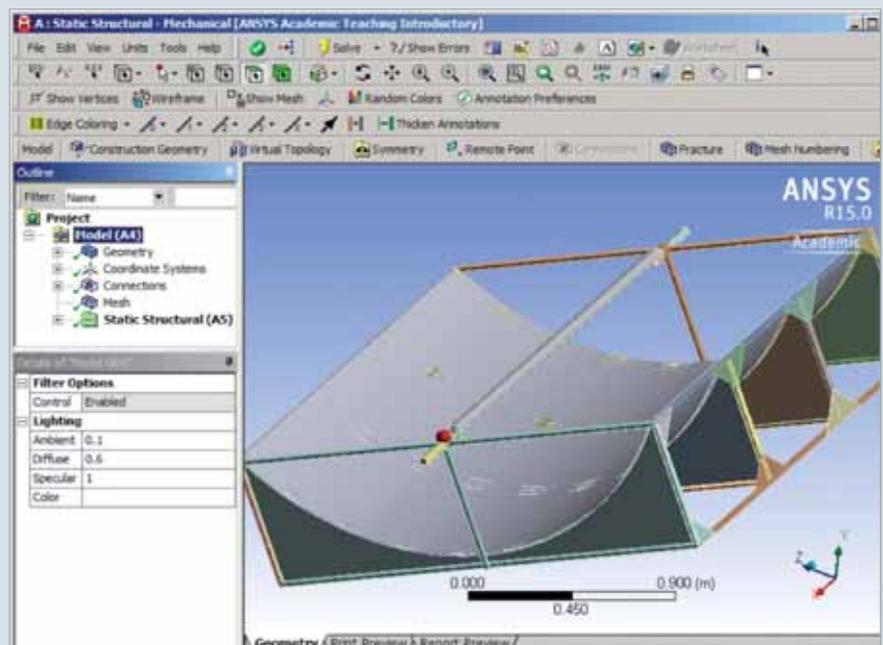
**Figura 3:** Perfil de parábola



**Figura 5:** Ventana Workbench, para exportación de Geometría.

La versión utilizada presenta una ventana de trabajo (Workbench) que nos permite manipular diferentes módulos de simulación aparte del estructural como de transferencia de calor, vibración, dinámica de fluidos, motores de combustión, etc.

Una vez ingresada la geometría se generan las condiciones de Model, Setup, Solution y Results; para ingresar las condiciones de contorno nos dirigimos a Model, que es una función del controlador del sistema Static Structural.



**Figura 6:** Ventana Model entrega de variables de contorno y solución numérica

El software nos dará las condiciones geométricas favorables en función del tipo de ensamble que se obtuvo en el CAD, para lo que necesitamos introducir condiciones de conexiones. En la parte izquierda de la ventana aparecen listas desplegables, (Outline) en las que se muestran dichas condiciones, para modificar y mejorar el

tipo de conexiones entre el dibujo primario y el modelo final. Cabe resaltar que utilizamos solo el colector parabólico sin sus bases, puesto que el número de nodos y elementos generados eran demasiados. Ello disminuyó la calidad de malla autogenerada por el programa con esta limitación.

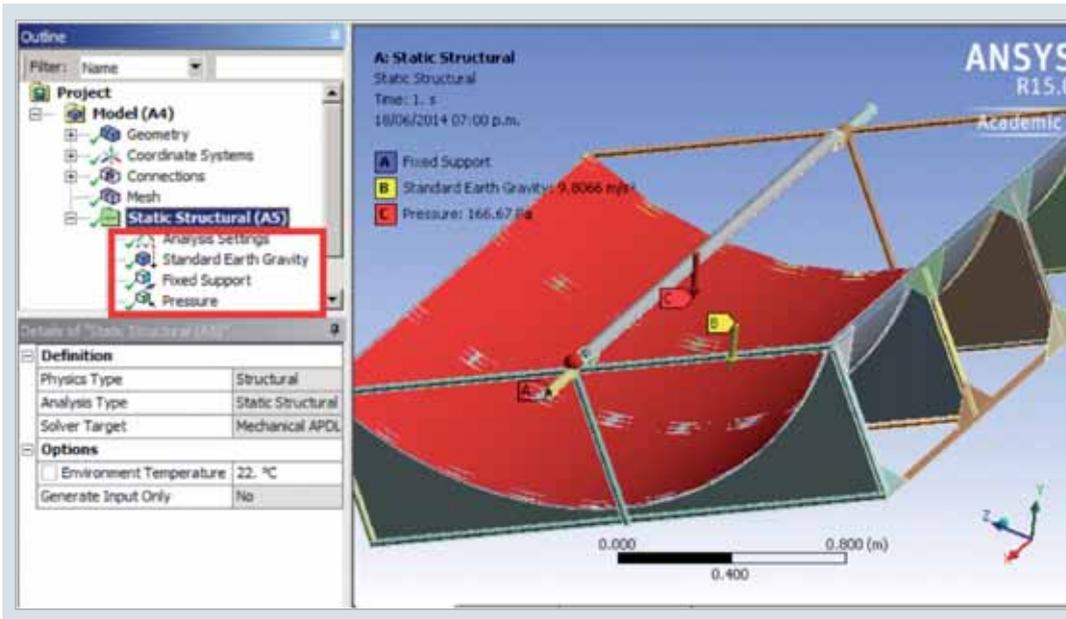


Figura 7: Lista desplegable de variables de contorno

Luego, procedimos a ingresar las variables de contorno, como la fuerza debido al peso (Standar Earth Gravity), los soportes fijos (Fixed Support) y la presión ejercida en la parábola del colector (Pressure).

El cálculo de la presión ejercida en la parábola se basó en el concepto de fuerza de arrastre mediante la aplicación de un  $C_d = 2.3$  para un cascarón semiesférico [1], y una velocidad de viento 40 km/h, la máxima registrada en la ciudad de Arequipa.

Con el cálculo de la presión se completó la definición de todas las variables de contorno.

## RESULTADOS

Calculamos la presión ejercida en la parábola debido a la fuerza de arrastre entre el área de la misma, obtuvimos un valor de 166.7 Pa. Para efectos de cálculo eliminamos la presión atmosférica, puesto que se anula al estar a ambos lados de la superficie, luego se procedió a ingresar la constante de presión.

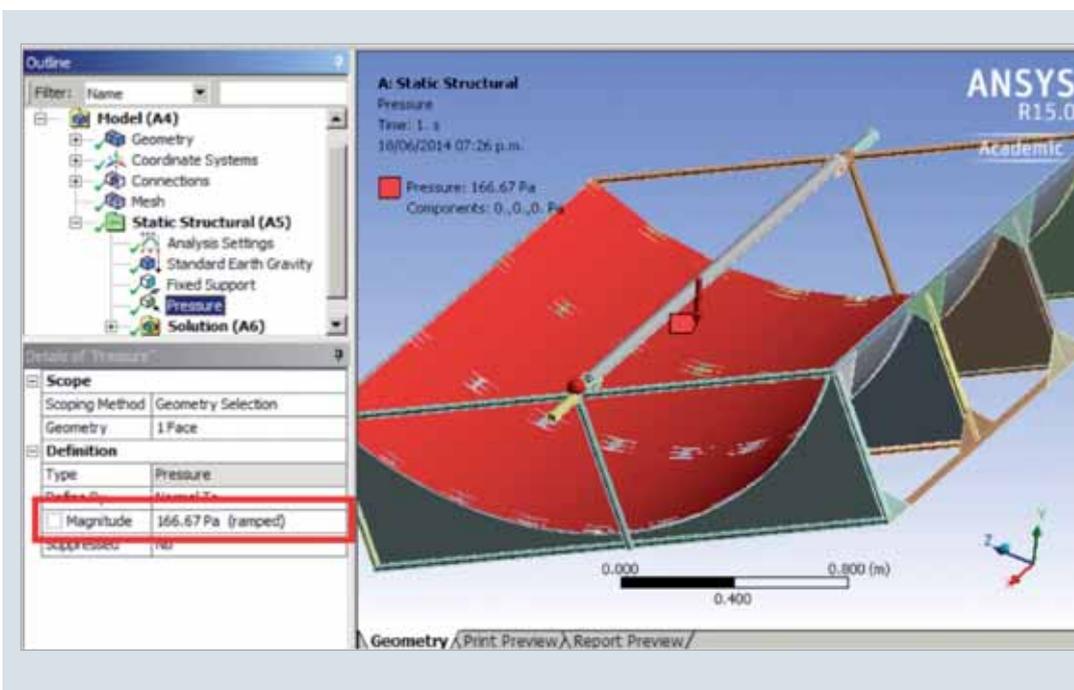


Figura 8: Colocación de la presión por carga de viento en arco parabólico.

Una vez colocadas las variables de presión, observamos la calidad de malla en toda la estructura, para examinar la coherencia entre los puntos, donde podrían encontrarse los mayores esfuerzos y deformaciones.

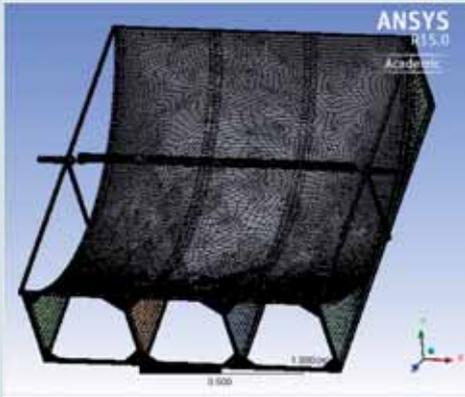


Figura 9: Calidad de malla de la estructura

Ejecutamos el programa con la calidad de malla en 100%, con las variables de contorno necesarias, procedimos a localizar la deformación y estimar su límite máximo y mínimo.

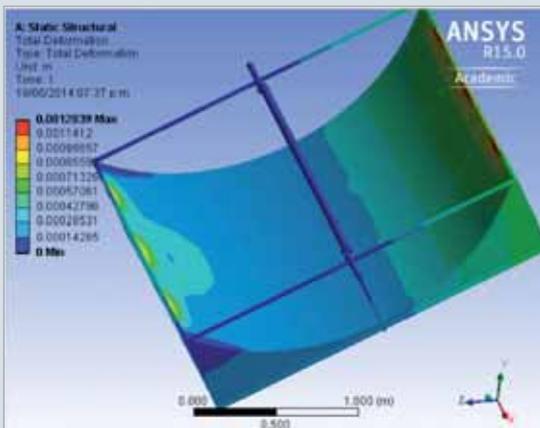


Figura 10: Vista superior de la deformación.

El límite máximo de deformación se ubicó en los laterales del ensamblado de la parábola, con un valor de 0.0012839 m o 1.2839 mm en las zonas de color rojo; mientras que el mínimo alcanzó el valor de 0 m en las de color azul, según la leyenda (figura 10).

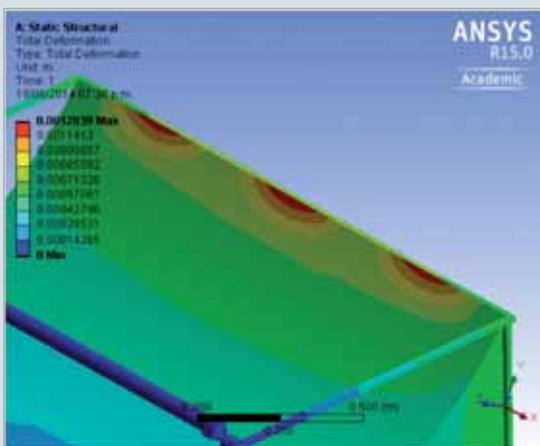


Figura 11: Vista del colector donde presenta mayor deformación.

Para calcular el esfuerzo utilizamos la tensión equivalente de Von Mises.

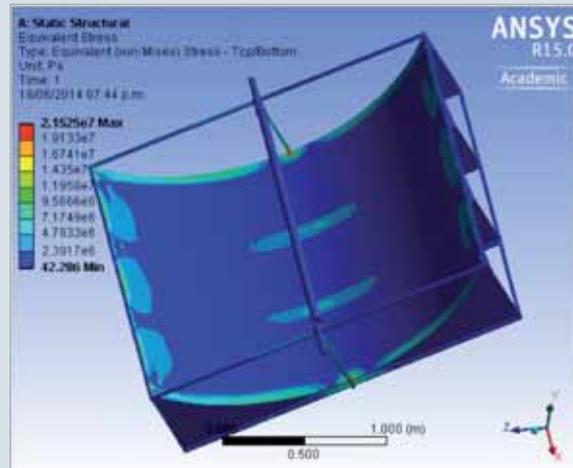


Figura 12: Vista superior del esfuerzo de Von-Mises.

Constatamos que el máximo esfuerzo equivalente se encuentra en la zona de acople del parante central con la base de parábola.

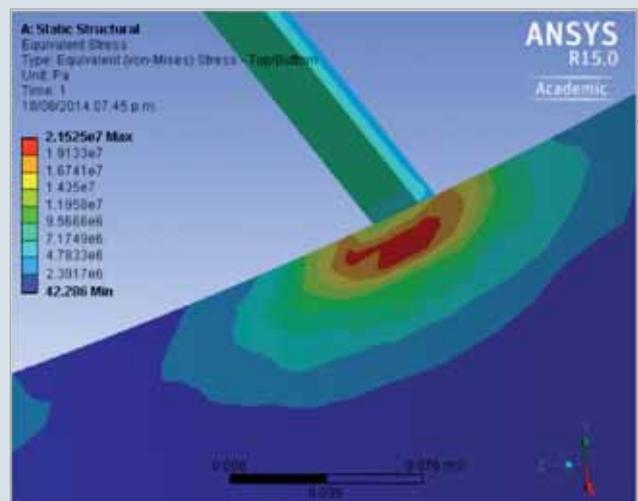


Figura 13: Unión donde se encuentra el mayor esfuerzo.

El máximo esfuerzo es de  $21.5 \times 10^6 \text{ N/m}^2$  que es menor que el módulo de Young del aluminio ( $6.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ) y del hierro ( $7.8 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ ). Los demás valores se muestran en la leyenda, según los colores (figura 13).

## CONCLUSIONES

Demostramos que en la parte lateral del colector se produce la mayor deformación por carga de viento, lo que se debe tomar en cuenta en la construcción del modelo.

El mayor esfuerzo equivalente (Von Mises) se genera en la parte inferior central de la parábola, no es mayor a la del esfuerzo del límite plástico tanto del aluminio como del acero, y no existe riesgo de deformación plástica.

Los presentes resultados confirman que se puede construir un colector parabólico con los perfiles y materiales utilizados en la simulación, con un factor de seguridad igual a 3, sin riesgo de rupturas ni deformaciones plásticas de la estructura.

## REFERENCIAS

- [1]** Cengel, Yunus & Cimbala, Jhon. (2003). Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones, Mc Graw – Hill, México D.F.
- [2]** Zienkiewtz.O & Morgan.K (1982). Finite Elements and Approximation, New Cork, Wiley.
- [3]** Livesley.R (1983). Finite Element: An Introduction for Engineer, Cambridge University Press, Cambridge. Great Britain.
- [4]** ANSYS Structural Mechanics (2013), Training Manual; USA; ANSYS, Inc.

## ACERCA DEL AUTOR

### César Vera Vasquez

MSc. en Termociencias por la Pontífice Universidade Católica de Rio de Janeiro (Brasil). Actualmente se desempeña como docente en el área de Mecánica en Tecsup-Sur, donde dirige el programa de Desarrollo y Promoción de Tecnología Basada en Fuentes de Energía Renovable.

 [cverav@tecsup.edu.pe](mailto:cverav@tecsup.edu.pe)