

An Analysis of Strength of Materials from Postulates of "Discourses and Mathematical Demonstrations Relating to two New Sciences" of Galileo Galilei

Uma Análise da Resistência de Materiais de Acordo com os Postulados da "Considerações e Demonstrações Matemáticas em duas Novas Ciências" da Galileu Galilei

Un Análisis de la Resistencia de Materiales a partir de los Postulados de "Consideraciones y Demostraciones Matemáticas sobre dos Nuevas Ciencias" de Galileo Galilei

Héctor E. Jaramillo S.

Universidad Autónoma de Occidente, Cali - Colombia
hjsuarez@uao.edu.co

(Artículo de REFLEXIÓN. Recibido el 11-03-2011. Aprobado el 18-05-2011)

Abstract

This paper presents an analysis of the assumptions made by Galileo Galilei in his book "Discourses and Mathematical Demonstrations Relating to Two New Sciences", from the standpoint of modern principles of Strength of Materials. Also the descriptive and numeric analysis of the proposals raised by Galileo showed, as cases application. It was found that these postulated keep valid today, and, although very basic currently, had not formally been made until that time, however, its importance lies in its contribution to laying the foundations of modern Strength Materials.

Keywords: Finite element, Galileo Galilei, propositions, Strength of Materials.

Resumo

Este trabalho apresenta uma análise das suposições feitas por Galileu Galilei em seu livro "Considerações e demonstrações matemáticas sobre duas novas ciências", do ponto de vista dos princípios modernos de Resistência dos Materiais. É igualmente a análise descritiva e numérica das propostas levantadas por Galileu, como uma aplicação individual. Verificou-se que estas suposições são válidas hoje válidas e, embora muito básicas, por enquanto, não foram formalmente até agora, mas sua importância reside na sua contribuição para estabelecer as bases da resistência de materiais modernos.

Palavras-chave: Elementos finitos, Galileu Galilei, proposições, Resistência dos Materiais.

Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de los postulados realizados por Galileo Galilei en su libro "Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias", desde la óptica de los principios modernos de la Resistencia de Materiales. Igualmente se hace un análisis descriptivo y numérico de las proposiciones planteadas por Galileo, como casos particulares de aplicación. Se encontró que estos postulados guardan vigencia actualmente y, aunque son muy básicos para la actualidad, no habrían sido formulados formalmente hasta este momento, sin embargo su importancia radica en su contribución al sentar las bases de la Resistencia de Materiales moderna.

Palabras clave: Elementos Finitos, Galileo Galilei, proposiciones, Resistencia de Materiales.

NOMENCLATURA

σ : Esfuerzo normal
M: Momento flector
I: Momento de Inercia de área
w: Peso por unidad de longitud
x: Distancia
L: Distancia entre apoyos
y: Distancia desde el centroide del área a la posición de la fibra

1. Introducción

Desde tiempos inmemorables, el hombre ha tenido la necesidad de protegerse de las inclemencias de la naturaleza, razones que justificaron la construcción de viviendas. Esas construcciones se erigían con base en reglas empíricas que se transmitían de generación en generación de forma verbal, y para lo cual no existía ningún tratado científico ni de investigación que definiera un estudio del comportamiento de los

materiales usados en su construcción. Se pueden mencionar grandes obras estructurales realizadas en diferentes culturas, como los egipcios, quienes construyeron grandes templos, pirámides (2778-2160 A.C.) y obeliscos; los chinos construyeron la Gran Muralla China (s. III A.C.) y ciudades fortificadas; y los aztecas que construyeron grandes ciudades. Pero los diseñadores y constructores de estos monumentos carecían de reglas para estimar la resistencia de las vigas y columnas que usaban, y se limitaron solamente a seguir las tradiciones del oficio, ya que no existían precedentes suficientes para esa época.

Pero para sustentar que sí poseían bases cabe mencionar que los griegos presentaron avances en el arte de la construcción, de los que se conoce el estudio de la "Determinación de los centros de gravedad" de Arquímedes (287-212 A.C.), teoría que

fue usada para transportar y levantar las columnas del templo de Diana de Efeso [1]. Con el nacimiento y el desarrollo del imperio Romano aparecieron grandes constructores, se conocen los grandes coliseos y el Pont du Gard en el sur de Francia. Los Griegos y los Romanos acumularon durante mucho tiempo experiencias en el arte de la ingeniería estructural; experiencia que tuvo poco auge durante la Edad Media y que sólo fue retomada con fuerza durante el Renacimiento. De esta época se conoce al arquitecto italiano Fontana (1543-1607) que levantó el obelisco del Vaticano por pedido del Papa Sixtus V. Durante este periodo también se destacan los aportes hechos por Leonardo Da Vinci (1452-1519) en sus notas “Testing the strength of iron wires of various lengths” (Enciclopedia Británica, 2011). Leonardo no sólo fue un artista sino también un gran científico e ingeniero, que tuvo un gran interés en el comportamiento y estudio de los mecanismos. También hizo investigaciones acerca de las cargas sobre columnas, lo que le llevó a plantear que “la carga varía inversamente con la longitud y directamente con la sección transversal” [2].

Está claro que Leonardo planteó algunos problemas acerca de la Resistencia de Materiales, como por ejemplo determinar la tensión de ruptura de una viga en función de su longitud, sección, puntos de apoyo y cargas, que aparece ilustrado en sus bosquejos (Fig. 1); aunque formula pregunta tras pregunta, ofrece pocas respuestas de forma meramente especulativa [3]. Esto evidencia el hecho de que Leonardo no realizó una investigación con profundidad al respecto y sólo lo dejó como un planteamiento más de los muchos que hizo y que dejó sin respuesta.

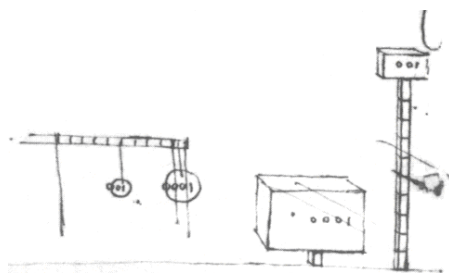


Fig. 1. Bosquejos de Leonardo da Vinci [3]

Sin embargo, se le reconocen algunos aportes a la ciencia y a la resistencia de materiales, como que fue el primero en dibujar la catenaria y proponer un estudio mediante un modelo discreto [3]. Este último se usa actualmente en la Resistencia de Materiales y otras ciencias, y también en aplicaciones específicas como el “método de elementos finitos”, técnica que en una de sus múltiples aplicaciones permite calcular los esfuerzos y deformaciones en sistemas estructurales.

Galileo se hizo famoso por su libro “Dos Nuevas Ciencias”, en el que muestra métodos aplicados al

análisis de esfuerzos donde presenta una secuencia lógica de análisis. Esto representa el inicio de la Resistencia de Materiales como “ciencia” [2]. Sin embargo sólo hasta el siglo XVIII se plantean de manera sistemática y analítica algunos elementos de la teoría de esta ciencia, para lo que se recogen los trabajos anteriores y especialmente los realizados por Galileo, y se dan los primeros intentos por dimensionar con cierta precisión elementos estructurales.

Una de las mayores obras de Galileo Galilei es “Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias”, publicado en 1630, cuatro años antes de la muerte del sabio Florentino. Las “dos nuevas ciencias” que alude este texto son la “Resistencia de Materiales”, que aborda en las dos primeras partes del libro, y el “Movimiento Local”, desarrollado en la tercera y cuarta parte. En este artículo se examina puntualmente uno de los aspectos sobre la Resistencia de Materiales que aborda Galileo en su libro, y se muestra cual fue el aporte y las limitaciones del modelo Galileano desde la óptica de la Resistencia de Materiales actual.

En su obra, Galileo aborda los planteamientos de la Resistencia de Materiales a partir de ocho proposiciones, sobre las cuales discurre su discurso y que fundamenta o explica a través de un dialogo entre sus tres personajes, Sagredo, Simplicio y Salviati. Salviati y Sagredo son caballeros cultos que simpatizan con el esquema Copernicano [4], y los utiliza para acelerar la argumentación llegando a conclusiones de mutuo acuerdo; mientras que Simplicio representa a los escolásticos, poco cultos en ciencias.

Respecto a las proposiciones planteadas por Galileo, se analizan los aportes realizados a la Resistencia de Materiales de sus proposiciones, pero no se detallan algunos aspectos considerados, ya que no hacen parte de la Resistencia de Materiales y en la actualidad corresponden a otras ciencias.

Para realizar un análisis a la obra de Galileo, es necesario ubicarse en su época para conocer las limitaciones técnicas y conceptuales que se tenía. Por ejemplo, sólo hasta 1822 Agustín Cauchy (1789-1857) creó el concepto genérico de esfuerzos [9], que es hasta el momento la base de la Mecánica de Medios Continuos, del que la Resistencia de Materiales es una de sus ramas o divisiones de estudio. Tampoco existía el cálculo infinitesimal, descubierto al mismo tiempo por Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) e Isaac Newton (1643-1727). Los hechos mencionados anteriormente sustentan el postulado de que la mayoría de las explicaciones de Galileo se deben tratar desde el punto de vista de la geometría, ya que era parte de su formación. Cabe mencionar, por ejemplo:

“¿Qué podemos decir, señor Simplicio?, ¿no debemos confesar que la geometría es el más poderoso instrumento para agudizar el ingenio y ponerlo a punto para discurrir y pensar? ¿No tenía muchísima razón Platón cuando exigía que sus alumnos antes que nada estuvieran bien impuestos en matemáticas?” [2].

Lo anterior es una muestra del tipo de formación que había recibido Galileo, y que es necesario tener en cuenta al realizar el análisis de su obra.

2. Análisis de las proposiciones

Proposición I

“Un prisma o cilindro sólido de cristal, acero, madera o cualquier otro material frágil, que sea capaz de sostener un peso muy considerable si se le ata longitudinalmente, se romperá si se le aplica transversalmente (como hemos indicado no hace mucho), aunque el peso sea sensiblemente menor, y tanto más cuanto más supere su longitud a su grosor”. [2].

De esta proposición se pueden destacar varios aspectos que aportaron de alguna manera a la Resistencia de Materiales. Como primer aporte, se tiene el hecho de que ya se plantea una clara diferenciación entre lo que es carga axial y carga transversal, y además de que la carga transversal depende de la relación entre la longitud de la viga (L) y la altura (h) de la sección transversal, es decir que la viga soportara menos carga en la medida que la relación (L/h) se hace mayor. Aunque Galileo no hace una cuantificación exacta entre la relación L/h y lo que él llama “resistencia” de la viga, y aunque tampoco se encuentra evidencia alguna de datos experimentales al respecto, se le puede abonar el hecho de tratar de encontrar una relación entre la resistencia de la viga y las propiedades geométricas del elemento prismático.

También se puede considerar como importante el hecho de que introduce en su manuscrito el término “Resistencia Absoluta a la fractura”, la cual define como “la que tiene lugar cuando la tracción se hace longitudinalmente”; en términos de la Resistencia de Materiales actual esto podría definir el concepto de esfuerzo último, que se puede definir como: “máximo valor de esfuerzo en el que se presenta la falla de una probeta sometida a un ensayo de tracción o carga axial”. Cabe aclarar que hasta ese momento, 1630, no se tenía definido el concepto de esfuerzo, que sólo se conoció hasta 1713 en un trabajo publicado por Parent [3]. Es destacable el hecho de que Galileo ya pensaba en un concepto de Resistencia Última, y que también relaciona la resistencia de un elemento sometido a carga transversal (viga) con la resistencia determinada mediante carga axial, suponiendo implícitamente el hecho de que en los dos casos están sometidos a esfuerzos de tipo normal, y además los compara entre sí.

Como contraparte de lo que pudo haber aportado Galileo a la Resistencia de Materiales en ésta

proposición, y con ayuda de uno de sus dibujos más conocidos y famosos, (ver Fig. 2) plantea: “Es evidente que si se rompe el cilindro, la fractura tendrá lugar en el punto B que es donde el muro actúa como punto de apoyo de la palanca BC” [2]. Esta afirmación es un hecho evidente de la experiencia adquirida por los constructores y artesanos de la época, por lo que no se puede considerar como un aporte de Galileo a esta ciencia, más allá del hecho de que realizara una justificación o discusión del fenómeno de la fractura.



Fig. 2. Dibujo de una viga en voladizo [3]

Entre otras cosas, Galileo en esta proposición también demuestra cual debería ser el valor de la carga puntual colocada sobre una viga en voladizo, considerando los efectos del peso propio, a partir de la Ley de la palanca y haciendo uso del concepto de centro de gravedad.

Proposición II

“Cómo y en qué proporción resista más una vara, o mejor dicho, un prisma más ancho que grueso, a dejarse romper, cuando la fuerza se aplica según su anchura en vez de según su grosor” [2].

En ésta proposición hay una gran preocupación de Galileo por encontrar una relación entre el ancho de la sección ac y la longitud bd (ver Fig. 3), debido a que ya en esa época se conocía que una viga colocada de canto soportaría mayor carga que una viga colocada de forma acostada. Planteado esto desde los conceptos de la Resistencia de Materiales actual se puede decir que, “para que una viga resista una mayor cantidad de carga, debe colocarse de manera tal que produzca el mayor momento de inercia (I) respecto de la carga aplicada, y para que esto suceda, si se trata de una viga rectangular, ésta deberá ser más alta que ancha”. Al respecto, Galileo sólo da como conclusión a su discusión que “el prisma que sea más ancho que grueso ofrecerá mayor resistencia a la fractura de canto que de plano y según la proporción que guarden la anchura y el grosor”.

Lo planteado por Galileo en esta anterior proposición no corresponde a un aporte significativo a la Resistencia de Materiales, ya que habla de una relación entre la anchura y el grosor de la sección pero no hace una cuantificación matemática de ella, y dado

que el hecho de que una viga colocada de canto resiste más que una viga colocada de forma acostada, era ya conocido y aplicado en esa época, lo que consta en las grandes edificaciones que existen en la actualidad y que data de muchos años antes de Galileo.

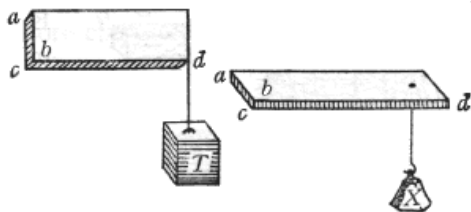


Fig. 3. Una viga cargada de diferente formas [3]

Proposición III

“Cuál es la proporción según la cual va creciendo la intensidad del propio peso, con relación a la resistencia a la fractura propia de un prisma o de un cilindro que se va alargando en sentido horizontal” [2].

Los efectos que produce el peso propio sobre la intensidad del momento flector, que a su vez lleva a la fractura del prisma (viga), es otra de las preocupaciones de Galileo que se evidencia y discute en esta proposición. De ésta proposición se puede rescatar el hecho de que plantea que el momento flector (M) producido por el peso propio es una función del cuadrado de la longitud. Desde los planteamientos de la Resistencia de Materiales actual esto es lo que sucede en una viga en voladizo (una viga empotrada en un extremo y libre en el otro), ya que para efectos del peso propio el Momento Flector es una función del cuadrado de la longitud, así:

$$M = \frac{wx^2}{2} \quad (1)$$

Donde w es el peso propio por unidad de longitud, y x es la distancia a la cual se desea el momento respecto del extremo libre.

Para deducir lo anterior, Galileo tuvo que haber hecho la consideración de que el peso propio se distribuye uniformemente sobre toda la longitud. Esto es posible dado que ya se conocían los estudios de determinación de los centros de gravedad hechos por Arquímedes (287-212 a.C.), y que parten del mismo principio.

Proposición IV

“En los prismas y cilindros de la misma longitud, pero de distinto grosor, la resistencia a la fractura crece en proporción al cubo de los diámetros de sus respectivos grosores, es decir de sus bases” [2].

Si se analiza un prisma cilíndrico trabajado como una viga, se puede calcular el esfuerzo (σ) en cualquier punto de ésta con la ecuación (2) [5]:

$$\sigma = \frac{My}{I} \quad (2)$$

Donde σ es el esfuerzo que soporta el prisma, M es el momento flector aplicado sobre la sección, y es la posición de la fibra respecto del centroide de la sección e I es el momento de inercia de la sección donde actúa el momento flector aplicado; sin embargo el concepto de momento de inercia (I), aparece mucho después de Galileo en los trabajos de Leibniz de 1684. Éste utiliza el concepto cuando define la variación de la tensión en las fibras de una viga sometida a carga [6].

Ahora, si el prisma es de sección transversal cilíndrica la ecuación (2) se reduce a:

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (3)$$

Donde d es el diámetro del elemento prismático. Como se observa en la ecuación (3), el esfuerzo depende del cubo del diámetro del elemento, por lo que en la medida que aumente el diámetro, el esfuerzo sobre el elemento es menor. De otra forma, se puede decir que si se tienen dos elementos de igual material, pero de diferente diámetro, el prisma de diámetro mayor soportará mayor carga antes de romperse que el de menor diámetro. Dicho con la terminología usada por Galileo, éste (el prisma de mayor diámetro) tendrá una “Resistencia Absoluta a la fractura” mayor que el de menor diámetro, y esta resistencia dependerá del cubo del diámetro.

Este análisis se presenta con el objeto de poder mostrar que la proposición presentada por Galileo estaba en lo correcto, aunque la explicación o discusión al respecto se hace a partir de relaciones geométricas. Se puede llegar a pensar que Galileo tuvo que haber realizado algún tipo de experimento donde cargara prismas (vigas), de diferentes diámetros, y haber hallado o determinado de forma experimental que “la resistencia del prisma depende del cubo de su diámetro”. Pero su tipo de formación no le permitía presentar estas afirmaciones desde el punto de vista del experimentalismo, sino que le debía encontrar una explicación de tipo matemático y específicamente geométrico, explicación en la cual falló, ya que su explicación en vez de aclarar la proposición lo que hace es enredarla en una maraña de conjeturas.

Adicionalmente y de manera acertada en la discusión de ésta proposición por parte de dos de sus personajes, Salviati y Simplicio, Galileo determina el hecho de que la resistencia a la fractura de un elemento —en este caso una cuerda, Fig. 4.— sometida a carga no depende de su longitud.

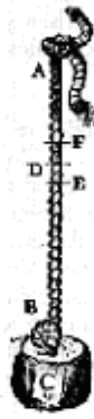


Fig. 4. Una cuerda sosteniendo un peso [3]

Proposición V

“Los prismas y los cilindros que difieren en longitud y en grosor tienen una resistencia a la fractura que es directamente proporcional a los cubos de los diámetros de sus bases e inversamente proporcional a sus longitudes respectivas” [2].

Si se parte del hecho de que Galileo trabajó con vigas empotradas en un extremo y libre en el otro, se puede determinar el momento flector en el empotramiento, que es donde se produce la falla, o donde el momento flector es mayor [7] debido a la carga aplicada, como:

$$M = PL \quad (4)$$

Reemplazando en la ecuación (4):

$$\sigma = \frac{32PL}{\pi d^3} \quad (5)$$

Partiendo de la ecuación (4) se puede decir, y en concordancia con el concepto de “resistencia a la factura” que manejaba Galileo, que ésta resistencia es directamente proporcional al cubo de los diámetros e inversamente proporcional a la longitud del prisma, muy acorde con lo expresado por Galileo en la proposición, aunque sin los argumentos matemáticos mostrados en las ecuaciones (4) y (5).

Proposición VI

“En el caso de cilindros y prismas semejantes, los momentos compuestos, es decir, los que resulta de multiplicar sus pesos y sus longitudes, actuando éstas como palancas, tienen entre sí la proporción sesquiáltera de la que se da entre las resistencias de sus bases respectivas” [2].

Galileo trata de explicar en esta proposición que debe haber una relación entre las medidas de un prisma — largo, ancho y espesor— con la “resistencia a la fractura”, pero sus conjeturas no lo llevan a conclusiones que tengan un aporte significativo a la Resistencia de Materiales, por lo que no se detallará más respecto de esta proposición.

Proposición VII

“Entre los prismas o cilindros pesados y semejantes, hay uno y solo uno que llega a encontrarse (a consecuencia de su propio peso) en un estado límite entre romperse y mantenerse todavía entero, de modo que todo aquel que sea más grande, incapaz de sostener su propio peso, se romperá, mientras que todo el que sea más pequeño opondrá alguna resistencia a la fuerza que se haga para romperlo” [2].

Proposición VIII

“Dado un cilindro o prisma que tenga mayor longitud compatible con no acabar rompiéndose debido a su propio peso, y dada una longitud mayor, encontrar el grosor de otro cilindro o prisma que bajo la longitud dada sea el único y el mayor capaz de resistir su propio peso” [2].

Se analizan a la vez las proposiciones VII y VIII debido a que están muy relacionadas entre sí. En estas proposiciones se hace evidente la preocupación de Galileo por encontrar las medidas de la sección transversal de un prisma —largo, ancho y espesor—, de manera que sea el único con esas medidas capaz de soportar los efectos de su peso propio. Así que aquel prisma cuyas medidas sean mayores proporcionalmente a éste, falle o se rompa debido a su peso propio, y aquel que sus medidas sean menores proporcionalmente, podrá ser capaz de resistir algún tipo de carga. Esto deja al descubierto que ya se tenía la preocupación de los efectos por peso propio, que en un momento dado pudiera llevar a la falla de una estructura o un elemento estructural determinado, aún sin sus cargas de trabajo. Lo anterior podría ser el intento de Galileo por explicar el desplome o caída de algunas estructuras en la etapa de construcción en su época.

El peso propio es uno de los factores que se consideran en la actualidad para diseñar una estructura [8], siendo de gran importancia ya que la tendencia general es a de tener estructuras cada vez más livianas y más resistentes. Las estructuras pesadas tienen efectos que se pueden llamar colaterales, por ejemplo en edificaciones donde una gran masa aumenta los efectos de los sismos sobre éstas y si se trata de una máquina, produce vibraciones excesivas que pueden hacer llegar el material a la rotura.

4. Conclusiones

Como conclusiones del análisis del trabajo de Galileo respecto de la Resistencia de Materiales, y adicionalmente a la discusión de las proposiciones dadas en las líneas anteriores, se pueden destacar algunos aspectos puntuales de la producción de Galileo. Por ejemplo, conviene mencionar que se evidencia una preocupación de Galileo por determinar formas más eficientes, que en ingeniería se conoce como “optimización de formas”, es decir, que resistan las mismas cargas pero con menor masa, con el objeto de evitar efectos debidos al peso propio que en algunos casos influye negativamente sobre el diseño. Esto se convierte en un aporte más a la Resistencia de Materiales si se observa desde el punto de vista que la Resistencia de Materiales como ciencia

aplicada. De esta manera se puede dar referencia a un diálogo sostenido entre los personajes de Galileo:

“De todo lo cual puede verse como disminuyendo el peso en más de un treinta y tres por ciento, se puede hacer techumbres de vigas sin que disminuya en un ápice su fuerza. Esto puede ser de gran utilidad en el caso de naves de gran tamaño, sobre todo, a fin de sostenerlas cubiertas, teniendo presente que en tales construcciones la ligereza es de suma importancia” [2].

A Galileo también se le debe abonar el hecho de ser el primero en analizar de manera formal aspectos que conciernen actualmente a la Resistencia de Materiales, independientemente si son correctos o no a la luz de la ciencia actual. Además, incluye conceptos como “resistencia a la fractura”, y un método experimental y analítico para abordar temas de este tipo. Conceptos y métodos que fueron depurados tiempo después por sus sucesores.

Cabe hacer la aclaración que la importancia del trabajo de Galileo radica en que con sus planteamientos dio inicio al desarrollo de una nueva ciencia, la “Resistencia de Materiales”. Aunque estos planteamientos, desde el punto de vista de la ciencia, no tuvieron el peso de una teoría estructurada, si orientó el trabajo de los investigadores y científicos que lo sucedieron. Por ejemplo y en orden cronológico, después de Galileo llegaron: Euler (1707-1783), Coulomb (1736-1806), Poisson (1781-1840), Navier (1785-1836), Cauchy (1789-1857) y Airy (1801-1892) [9] entre otros, los cuales dieron cimientos a las bases teóricas de la Resistencia de Materiales actual. Bases teóricas que desde hace varios siglos rigen el diseño estructural, que hoy permite contar con viviendas, máquinas y equipos con mayores grados de confiabilidad en su diseño, y que hacen la vida del hombre actual más confortable.

El aporte de Galileo Galilei, por pequeño que parezca, dio inicio al desarrollo de una ciencia que hoy puede considerarse entre las de mayor importancia para el desarrollo de la infraestructura vial y de bienes de capital de un país. El desarrollo de ésta ciencia, la aplicación de las matemáticas y la ayuda de los computadores, han permitido crear técnicas avanzadas para la determinación de esfuerzos y deformaciones en elementos estructurales. Técnicas que permiten determinar los esfuerzos y las deformaciones en estructuras bajo condiciones cambiantes de carga, temperatura y otros, y que con ayuda del computador se pueden realizar en cuestión de minutos o segundos.

Una de estas técnicas, aplicada a la ingeniería, es “el método de elementos finitos” [10], con el cual se hará un análisis de un modelo similar al de la Fig. 2.

REFERENCIAS

- [1] R. García. “Pequeño Larousse Ilustrado”. Colombia: Ediciones Larousse S.A. 1991.
- [2] B. Kouznetsov. “Galileo Galilei”. La Habana: Editorial científico-técnica. 1973.
- [3] C. Truesdell. “Ensayos de la Historia de la Mecánica”. Madrid: Editorial Tecnos S.A., pp. 26-40, 1975.

Esto no con el objeto de comparar las afirmaciones hechas por Galileo al respecto, si no de mostrar hasta qué punto un “pequeño” aporte ha evolucionado en una serie de teorías aplicadas, que en la actualidad rigen el diseño estructural de toda obra de ingeniería conocida.

De esta manera en la Fig. 5 se muestra el caso analizado por Galileo, desde el punto de vista de un análisis por elementos finitos. Las zonas de color rojo, muestran la mayor concentración de esfuerzos, que es donde el material presentara la rotura o falla. La Fig. 6 muestra estas zonas en mayor detalle, al ser una ampliación. Con esto no se pretende magnificar el aporte de Galileo, sino hacer notar que en los tiempos de Galileo no existían muchas de las herramientas matemáticas, experimentales y de informática que existen hoy, y que son instrumentos indispensables para los investigadores de este siglo.

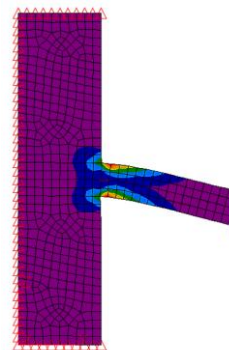


Fig. 5. Modelo por elementos finitos de una viga en voladizo [11]

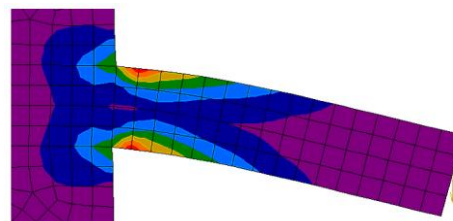


Fig. 6. Detalle de los esfuerzos ocurridos en una viga en voladizo [11]

Al revisar esta jornada de Galileo, el lector se puede percatar que termina de forma abrupta, lo que manifiesta el hecho de que Galileo la dejó inconclusa y muy posiblemente pretendía seguir desarrollándola. Por lo anterior no se puede dejar de plantear algunas inquietudes al respecto, como ¿qué motivos hicieron que Galileo no continuara con esta jornada? Y, debido a esto, ¿qué pudo haber perdido la Resistencia de Materiales como ciencia?

- [4] T. Ferris. "La aventura del Universo". Barcelona: Grijalbo Mondadori editores, pp. 78-83. 1997.
- [5] P. Beer, E. R. Jhonson & J. T. DeWolf. "Mecánica de Materiales". Massachusetts: Mc Graw Hill, pp. 105 120, 1982.
- [6] L. Ortiz. "Elasticidad". Madrid: Mc Graw Hill, 1998.
- [7] B. W. Fowler. "Estática: Mecánica para ingenieros". Delaware: Addison Wesley, pp. 439-471, 1996.
- [8] A. H. Nilson. "Diseño de Estructuras de Concreto". México: Mc Graw Hill, pp. 2-25, 1994.
- [9] S. P. Timoshenko. "History of Strength of Materials". New York: Dover Publications, pp. 104-110, 1983.
- [10] T. R. Chandrupatla & A. D. Belegundu. "Introducción al estudio del Elemento Finito en Ingeniería". México: Prentice Hall, 1999.
- [11] www.algor.com [Marzo 4 de 2011]. 