GALILEO, FUNDADOR DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES

(Contribución a la conmemoración del 4º centenario del nacimiento de Galileo)

Por *Fernando Luiz Lobo B. Carneiro*, Ingeniero, Profesor del Curso de Bases Experimentales de la Resistencia de Materiales, en el Instituto Nacional de Tecnología, Río de Janeiro, Brasil

Traducido del francés por *Alonso E. Rhénals Figueredo*

RESUMEN:

1 Introducción.

2 Galileo y la noción de tensión de ruptura.

3 La teoría de la flexión de Galileo.

4 Galileo, la teoría de la similitud y la teoría de los modelos.

5 Galileo y la noción de tamaño-límite. La "debilidad de los gigantes".

6 Influencia de Galileo en el desarrollo de la investigación experimental.

7 Conclusión.

"Las primeras tentativas para determinar por medio del cálculo las dimensiones seguras de los elementos de una estructura fueron realizadas en el siglo XVII. El famoso libro de Galileo titulado "Dos Ciencias Nuevas" muestran los esfuerzos de su autor para exponer en secuencia lógica los métodos aplicables al análisis de los esfuerzos resistentes. Este libro representa los principios de la ciencia de la resistencia de los materiales... **(3, p. 6)**;... y a partir de este momento comienza la historia de la mecánica de los cuerpos elásticos **(3, p. 11)**; **Timoshenko** (1)".

(1) "The first attempts to find the safe dimensions of structural elements analytically were made in the seventeenth century. Galileo's famous book "*Two New Sciences*" shows the writer's efforts to put the methods applicable in stress analysis into a logical sequence. It represents the beginning of the science of strength of materials...; and from that date the history of mechanics of elastic bodies begins" (TIMOSHENKO).

1 INTRODUCCION

Se conmemora en el mundo entero el cuarto centenario del nacimiento de Galileo. Fundador indiscutible de la dinámica y de la física moderna, su contribución a la revolución metodológica, que ha hecho posible el prodigioso desarrollo científico iniciado en el siglo XVII, fue fundamental y decisiva. Sus descubrimientos astronómicos (2) aportaron sólidos argumentos en favor de la teoría heliocéntrica de Copérnico, en oposición a la teoría geocéntrica de Ptolomeo, al mismo tiempo que su célebre principio de la coexistencia de los movimientos, o de la relatividad, eliminaba la principal objeción contra el doble movimiento de la tierra.

Sin embargo, hay en la obra de Galileo un aspecto menos conocido que los arriba mencionados: la fundación de la Resistencia de Materiales. **Timoshenko,** en su "Historia de la Resistencia de Materiales" **(3)**, después de examinar algunas contribuciones de Leonardo de Vinci, dedica a Galileo todo el capítulo I y no vacila en atribuírle este papel.

"El famoso libro de Galileo 'Dos Ciencias Nuevas', afirma **Timoshenko,** representa el comienzo de la ciencia de la Resistencia de los Materiales". La opinión de este autor es compartida por otros autores que se han ocupado de la historia de esta ciencia, como **S. B. Hamilton (4, p. 376)** y L' Hermite **(5, p. 1). C. Truesdell (6)** encontró en Galileo el ejemplo más antiguo de la noción de tensión y L' Hermite **(7, p. 510)** atribuye a Galileo, no sólo la hipótesis más antigua sobre la ruptura, sino la idea de los ensayos de los modelos **(8, p. 402).** A pesar de esta aceptación prácticamente unánime del papel de Galileo como fundador de la Resistencia de Materiales, los detalles de su contribución científica en este dominio son, en general, poco conocidos. El objeto de este artículo es, precisamente, contribuír a su divulgación.

Las investigaciones de Galileo sobre la Resistencia de Materiales fueron realizadas casi todas durante el tiempo que residió en la República de Venecia, como profesor en la Universidad de Padua (la "Bo"), entre 1.593 y 1.610. No obstante, los resultados de estas investigaciones no fueron publicados sino varios años más tarde en el libro "Discurso y Demostraciones Matemáticas sobre Dos Ciencias Nuevas", escrito de 1.633 a 1.637, en la etapa final de su vida; era a la sazón prisionero de la inquisición y estaba condenado a no salir de su casa de

(2) "Las montañas de la luna, los satélites de Júpiter, las fases de Venus, la naturaleza de las manchas solares, descubrimientos hechos por Galileo con ayuda de un telescopio fabricado por él mismo, producto del perfeccionamiento de un instrumento análogo inventado en Holanda, como cuenta en su libro "*Sidereus Nuncius*".

campo Arcetri, cerca de Florencia, situación que se prolongó hasta su muerte, en 1.642. Este libro es considerado como la obra principal de Galileo, y las "Dos Ciencias Nuevas" son la Resistencia de Materiales y la Dinámica. Todo parece indicar que el deseo de reunir en un volumen, para la posteridad, sus descubrimientos científicos más importantes fue una de las razones más poderosas para abjurar de la teoría de Copérnico delante del Santo Oficio en Roma, en 1633. Estos descubrimientos no habían sido divulgados antes sino de una manera muy parcial y fragmentaria en las cartas a sus discípulos y amigos. La impresión del libro se realizó fuera de Italia, en Leyden, Holanda, en medio de grandes dificultades. Elsevir, el editor de la obra, y el embajador de Francia en Roma, el Conde de Noailles, antiguo discípulo de Galileo, convinieron en suministrarle una "coartada" simulando haber tomado la iniciativa de su publicación a espaldas de él. Un año después, en 1639, fue publicada en París una traducción fracesa de la obra, la cual contribuyó a la rápida difusión de las ideas de Galileo. Llevaba el título un poco extravagante: "Los nuevos pensamientos de Galileo, matemático e ingeniero del Duque de Florencia". Tal título tiene la virtud de mostrarnos que Galileo no sólo era conocido por sabio sino también como hombre que se ocupaba de las aplicaciones técnicas de la ciencia.

En la obra antes mencionada, Galileo dedica a la Resistencia de Materiales las primeras páginas de la Primera Jornada y toda la Segunda. El resto de la Primera Jornada está dedicada a cuestiones muy variadas, como los infinitamente grandes y los "indivisibles", el peso del aire y la resistencia que éste ofrece al movimiento de los cuerpos, el péndulo simple, la frecuencia de las cuerdas vibrantes. La Tercera y la Cuarta Jornada encierran la contribución más importante de Galileo a la ciencia moderna: la fundación de la dinámica. Se ocupan, respectivamente, del movimiento uniforme y uniformemente acelerado y del movimiento de los proyectiles. Las dos primeras leyes de la mecánica y la ley del choque de los cuerpos, el "paralelogramo de velocidades", el plano inclinado, la trayectoria de los proyectiles están tratados allí en forma sobresaliente.

Los "Discursos sobre Dos Ciencias Nuevas" están escritos en forma de diálogo, forma ésta empleada ya por Galileo en 1631, en el "Diálogo sobre los Dos más Grandes Sistemas del Mundo". Sus opiniones y demostraciones son expresadas por "Salviati" y comentadas por un discípulo, "Sagredo"; el tercer personaje, "Simplicio", representa la mentalidad escolástica de la época, dogmáticamente sumisa a la letra de los textos de Aristóteles, que oponía a la evidencia experimental razonamientos apriorísticos y arbitrarios.

En la actualidad se dispone de dos ediciones de "Dos Ciencias Nuevas": la magnífica edición italiana de 1958, con notas y comentarios de A. Carugo y L. Geymonat **(1)**; y la traducción inglesa de H. Crew, y A. de Savio **(2)**. En una y otra se indican los números de las páginas correspondientes a la gran "edición nacional" de las obras completas de Galileo (en reimpresión) la cual se toma siempre como referencia para las citas. La materia comentada en el presente artículo corresponde a las páginas 49 a 65 (comienzos de la Primera Jornada) y 151 a 189 (toda la Segunda Jornada).

Antes de concluír esta introducción conviene examinar cuáles pudieron haber sido las razones que motivaron a Galileo a interesarse por la Resistencia de Materiales. El mismo nos suministra una indicación sobre la naturaleza de estos motivos, con las palabras pronunciadas por "Salviati" al comienzo de la Primera Jornada **(1, p. 49)**. (3)

"La constante actividad de vuestro famoso arsenal, ciudadanos de Venecia, suministra a los estudiosos un amplio campo de meditaciones, particularmente el departamento dedicado a la mecánica. Allí, entre los artesanos que fabrican continuamente toda clase de instrumentos y máquinas hay algunos que han llegado a ser altamente expertos y hábiles en sus oficios, ya por las observaciones recibidas de sus antecesores, ya por su propia experiencia diaria".

Galileo se refiere al Arsenal de Venecia, gran taller naval y de construcciones mecánicas, a la sazón célebre en toda Europa, visitado a menudo por él durante su estada en Padua y en el cual ejerció las funciones de Consejero técnico.

Galileo revela enseguida la naturaleza del problema que encontró inicialmente, punto de partida de sus investigaciones sobre la Resistencia de Materiales: el problema de las **estructuras geométricamente semejantes** de máquinas o de edificios que, teniendo un comportamiento satisfactorio cuando son ejecutadas en cierta escala, fracasan completamente cuando son ejecutados a una escala más grande, ya como consecuencia de una reducción inesperada de su capacidad de resistir sobrecargas adicionales, ya derrumbándose, simplemente, bajo la acción de su peso propio. Se verá, a continuación, que Galileo no sólo encontró la explicación correcta del fenómeno, sino que estableció re-

(3) "Salviati: Largo campo di filosofare a gl'intelleti specolativi parmiche porga la frequente pratica del famoso arsenale di voi, Signori Veneziani, ed in particolare in quella parte che mecanica si demanda; atteso che quivi ogni sorti di strumento e di machina vien continuamente posta in opera da numero grande d'artefici, tra iquali, e per l'osservazioni fatte dai loro antecessori, e per quelle che di propria avvertenza vanno continuamente per se stessi facendo, e forza che ve ne siano de i peritissimi e di finissimo discorso".

glas cuantitativas para hallar las dimensiones seguras de las estructuras.

Debemos recordar que las estructuras que se construían en tiempos de Galileo, tales como edificios y puentes, máquinas, tenían, en general, como carga principal su peso propio. Las dimensiones de estas estructuras se establecían de manera empírica, y los casos de derrumbamiento por la acción de su propio peso eran frecuentes cuando un arquitecto más audaz ensayaba sobrepasar los tamaños y alturas usuales. Tales accidentes llevaban, naturalmente, a los constructores, a introducir refuerzos suplementarios, que una simple semejanza geométrica con estructuras de tamaño más pequeño no dejaba prever; o a concluír, sencillamente, que para cada tipo de estructura había cierto "tamaño límite" que no podía ser superado. El desarrollo de la arquitectura gótica, con sus catedrales cada vez más altas, y, más tarde, durante el Renacimiento, la ejecución de grandes bóvedas, hicieron más evidente este fenómeno. Se cita, por ejemplo, el derrumbamiento de la nave de la Catedral de Beauvais, que llevó a los constructores de la Edad Media a concluír que existía un límite de altura y de tamaño que no podría ser sobrepasado impunemente.

Galileo, en la Segunda Jornada de "Dos Ciencias Nuevas", muestra que cuando todas las dimensiones de una viga se multiplican por un mismo factor, guardando la semejanza geométrica, las fuerzas resistentes interiores resultantes de las tensiones del material, crecen proporcionalmente al cuadrado de este factor, mientras que las fuerzas resultantes de la acción de la gravedad crecen proporcionalmente al cubo. Si se emplea el lenguaje moderno, esto significa que la simple semejanza geométrica no implica, en este caso, la similitud física. Esta es la idea central de Galileo expuesta en la introducción de la Primera Jornada. **(1, pp. 50 a 54)**. Plantea de nuevo el problema, en toda su profundidad, en la Segunda Jornada, llegando a hacer incursiones en los campos de la Biología mediante consideraciones originales sobre la debilidad de los gigantes.

Galileo, en sus estudios, aborda frecuentemente los problemas desde un punto de vista muy actual, el de la "similitud". Esto ha sido muy bien comprendido por los traductores ingleses de "Dos Ciencias Nuevas" **(2)**, como se ve en la nota que ponen al pie de la página 157 (de la "edición nacional"). Al tratar el error contenido en la teoría de la flexión de Galileo —que afecta únicamente el **coeficiente numérico** de la fórmula que expresa el momento flector de ruptura en términos de las dimensiones de la sección transversal y de la tensión de ruptura del material— dicen: "Afortunadamente este error no quita validez a las conclusiones de las proposiciones que se siguen, las cuales tratan únicamente de proporciones y no de resistencias efectivas de vigas". Es exacto; todas las deducciones sacadas por Galileo de su teoría de la flexión tienen como objeto el paso de una estructura conocida a otra geométricamente semejante, construída en otra escala. Todas las reglas dadas por Galileo para este efecto son, en esencia, correctas. Constituyen el embrión de la teoría moderna de los modelos estructurales. La lectura de las obras de Galileo a la luz de la teoría de la semejanza física es fascinante y permite descubrir nuevos aspectos del genio del gran sabio italiano.

En conclusión, parece que la hipótesis según la cual las investigaciones de Galileo sobre la Resistencia de Materiales tuvieron como punto de partida una consulta hecha por el Arsenal de Venecia, es muy probable. Estas investigaciones habrían sido provocadas y estimuladas por las necesidades prácticas de la industria naciente, tanto mecánica como de construcción.

2 GALILEO Y LA NOCION DE "TENSION DE RUPTURA".

Al comienzo de la Primera Jornada, Galileo aborda la cuestión de la resistencia a la tracción de cuerpos prismáticos y cuerdas (pp. 54 a 65 de la "edición nacional" de las obras completas de Galileo **(1)**). Las figuras de las pp. 55 a 162 de **(1)** representan ensayos de tracción en los cuales la pieza está fijada por su extremo superior y tirada por su extremo inferior por medio de un peso. "Este peso, dice Galileo, puede ser aumentado paulatinamente hasta cuando se produzca la ruptura del cuerpo", la cual sobreviene cuando su "tenacidad" y "coherencia" son alcanzadas. En el caso de cuerdas, la fricción entre las fibras es más fuerte que su resistencia y asegura la integridad del conjunto hasta la ruptura, aunque las longitudes de estas fibras sean mucho más pequeñas que la de la cuerda.

Después de estas consideraciones, Galileo, examinando la hipótesis según la cual la resistencia a la tracción sería debida únicamente a la "fuerza del vacío", muestra que la contribución de ésta es, en general, despreciable, y que es necesario introducir otra causa, semejante a un engrudo o a una materia viscosa que sujetara firmemente las partes componentes de un cuerpo. **(p. 59,1)**. La "fuerza del vacío" podría medirse con la ayuda de un instrumente ingenioso que él describe; las experiencias que ha hecho con las bombas de succión muestran que la altura máxima de una columna de agua es aproximadamente 18 "codos" (9 metros), independientemente del diámetro". Esta altura da la "fuerza del vacío" en un cilindro de cualquier material sólido. El valor indicado por Galileo corresponde a 0.9 Kg/cm^2, es decir, prácticamente el valor de la presión atmosférica, estudiada algunos años más tarde por su discípulo Torricelli y por Pascal. A continuación, da una cifra para la resistencia de los hilos de cobre: "todos los hilos de cobre, independientemente de sus diámetros, pueden soportar su propio peso hasta una longitud de 4.801 codos (2.400 mts.) y no más". **(p. 65,1)**. Empleando el lenguaje técnico moderno se podría decir que Galileo atribuía a la resistencia de un material las "dimensiones" de una presión; esta resistencia estaría dada por el producto del peso específico por la longitud correspondiente a la ruptura bajo la acción del propio peso del hilo. "Como el cobre tiene una densidad 9 veces más grande que la del agua", "la porción correspondiente a la 'fuerza del vacío' sería equivalente al peso de sólo 2 codos (1 metro) de hilo; por lo tanto, despreciable. Es interesante notar que el valor dado por Galileo para la resistencia a la tracción del cobre es así de 2.160 Kg/cm^2, cifra perfectamente aceptable.

En la Segunda Jornada, Galileo afirma claramente que la "resistencia a la ruptura por tracción longitudinal", que él llama también "resistencia absoluta", es proporcional a la superficie de la base del prisma **(p. 160, 1)** e independiente de su longitud **(p. 162, 1)**. Para demostrar este último punto, Galileo hace el razonamiento siguiente: "Sea una cuerda AB, fijada por su extremo superior A. Suspendamos en su extremo inferior un peso exactamente suficiente para romperla y supongamos que la ruptura se produce en D (figura de la p. 162 de 1). Si este peso, en lugar de estar suspendido en el extremo inferior B, estuviera fijo en un punto más próximo a D, digamos en E; y si la cuerda, en lugar de estar fijada por su extremo superior A estuviese suspendida por F, inmediatamente por encima de D, ¿no es solicitada en D por la misma fuerza?. Sí, con tal que el peso inferior sea aumentado con el peso del fragmento EB de la cuerda. En este caso, la ruptura de la cuerda tendrá lugar en D, y con la misma fuerza aunque FE sea mucho más pequeño que AB. La cuerda más larga no es más débil que la más corta". (Ver también figura 1 (a) de este artículo).

De esta manera estableció Galileo, de primero, la noción de esfuerzo interior solicitante, resultante de la acción de una parte del cuerpo prismático sobre la otra, a través de una sección transversal, y formuló la hipótesis más antigua sobre la ruptura, basada en la noción de tensión de ruptura como característica física de un material. Esta hipótesis es confirmada experimentalmente por los estados de tensión simple; y es hoy adoptada corrientemente en los casos donde se presentan estados de tensiones tales como tracción, compresión y flexión simple.

La teoría de Galileo sobre la ruptura de piezas prismáticas solicitadas por una fuerza de tracción longitudinal es traducida por las fórmulas siguientes, con las notaciones modernas:

Fr = fuerza longitudinal de tracción capaz de producir la ruptura del prisma,

A = área de la sección transversal del prisma

σr = tensión de ruptura, a la tracción, del material

γ = peso específico del material

llím = longitud-límite del prisma vertical fijado por el extremo superior y que se rompe bajo la acción de su peso propio.

Fórmula: (a) $Fr = A \cdot \sigma r$

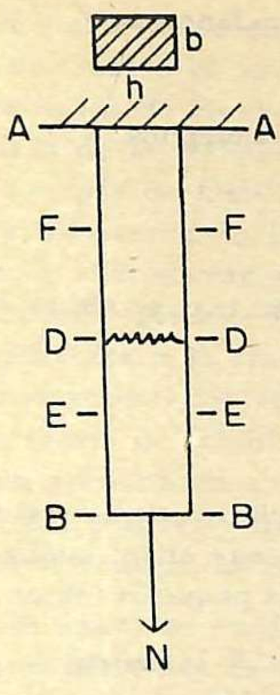
(b) $\sigma r = \gamma \cdot l_{lím}$

3 LA TEORIA DE LA FLEXION DE GALILEO

Galileo inicia la Segunda Jornada haciendo una clara distinción entre la resistencia a la tracción simple y la resistencia a la flexión: "la resistencia de los cuerpos sólidos a las solicitaciones exteriores ("violenta atrazzione") es muy grande cuando la fuerza es aplicada en dirección longitudinal ("per diritto gli tira"), pero mucho más pequeña cuando es aplicada transversalmente ("nel violentargli per traverso"). La fuerza capaz de producir la ruptura de un prisma empotrado en un extremo y libre en el otro es mucho más pequeña cuando se aplica sobre este extremo normalmente al eje que cuando es paralela al eje. **(1, p. 151)**.

La teoría de la flexión de Galileo está basada en la hipótesis de que toda sección de ruptura trabaja a tracción, y gira alrededor de una charnela que se confunde con el borde comprimido (fig. 1). La fuerza interior que se opone a la ruptura es igual a la resistencia del prisma en tracción longitudinal, y su "brazo de palanca" es igual a la distancia del centro de gravedad de la sección transversal al borde comprimido (y por tanto igual a la mitad de la altura de la sección sólo para los casos considerados por Galileo de secciones simétricas). Empleando el lenguaje moderno, esta hipótesis consiste en admitir que las tensiones de tracción se distribuyen uniformemente en toda la superficie de la sección transversal y que el "eje neutro" se sitúa en el borde comprimido; las tensiones de compresión serán allí, por consiguiente, infinitamente grandes.

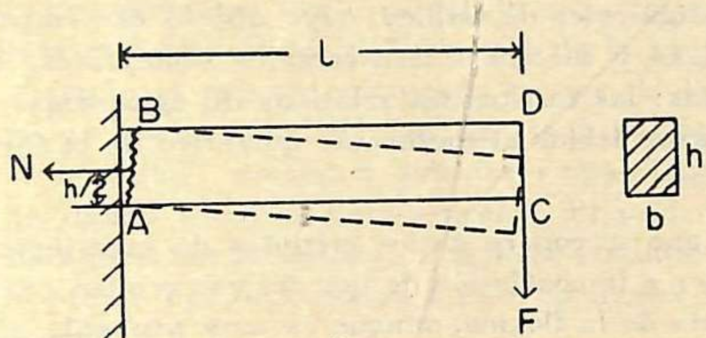
Para obtener el momento flector de ruptura basta multiplicar la resistencia del prisma en tracción longitudinal Nr, que Galileo llama



$$N_r = (b.h)\,\sigma_r$$

$$N_r = A\,.\,\sigma_r$$

(a)



(b)

$$F\,.\,l = N_r\,.\,\frac{h}{2} = \frac{b.h^2}{2}\,.\,\sigma_r$$

$$M_r = A\,.\,\frac{h}{2}\,.\,\sigma_r$$

Figura No. 1

Teoría de Galileo sobre la Flexión

σr = Tensión de ruptura del material

A = Area de la sección transversal

N_r = Resistencia de un prisma a la tracción longitudinal.

"resistencia absoluta", por el brazo de palanca z;

$$Mr = Nr.z = (A.\sigma r)\,z$$

o, en el caso de una sección transversal simétrica:

$$Mr = Nr.\frac{h}{2} = (A.\sigma r)\frac{h}{2}$$

Para una sección rectangular de base b y de altura h se tendría:

$$Mr = (b.h.\ \sigma r)\frac{h}{2} = \frac{(b.h^2)\ \sigma r}{2}$$

Esta fórmula difiere de la fórmula clásica de la resistencia de materiales, basada en la ley de Hooke, apenas en el coeficiente numérico, siendo en la teoría elástica 3 veces más pequeño (1/6 en lugar de 1/2).

La fórmula general que corresponde a la teoría de la flexión de Galileo es dimensionalmente homogénea. Hasta para las secciones no rectangulares, el error que se comete aceptando esta teoría afecta solamente el coeficiente numérico. Esta comprobación es de mucha importancia, como lo hemos hecho notar en la introducción. Todas las deducciones subsiguientes de Galileo, cuyo objeto es comparar las resistencias de vigas y secciones transversales semejantes, son perfectamente correctas: las resistencias relativas de estas vigas no son afectadas por el error debido al coeficiente numérico de la fórmula del momento resistente.

Todo lo que se conoce de los métodos de investigación científica de Galileo lleva a la conclusión de que tal vez realizó ensayos para verificar su teoría de la flexión, aunque es muy probable que haya podido hacer ensayos directos de tracción simple, a excepción de los ensayos con hilos. Ahora bien: todos los ensayos comparativos entre vigas de diferentes dimensiones, con la misma forma de sección transversal, no permiten descubrir el error contenido en la fórmula de Galileo. Fue más tarde, en 1680, cuando Mariotte pudo realizar algunos ensayos directos de tracción de prismas, para determinar la relación entre esta resistencia y su resistencia a la flexión **(1)**. (Nota correspondiente a la página 121). Encontró que el coeficiente 1/2 de Galileo era un poco elevado y propuso una modificación de su teoría escogiendo el coeficiente 1/3 para las secciones rectangulares; y no sigue suponiendo que las tensiones de tracción se distribuyen uniformemente por toda la sección, sino que sufren una disminución lineal desde un valor máximo, en el extremo a tracción, al valor cero, en el extremo comprimido **(4 p. 376)**.

Cuando se habla del error del coeficiente numérico de la teoría de la flexión de Galileo es necesario no olvidar que la hipótesis elástica, basada en la ley de Hooke, no es más exacta; hay un error en las fórmulas clásicas de la resistencia de materiales, pero en sentido contrario al de la teoría de Galileo. Las fórmulas basadas en las teorías plásticas están más cerca de la realidad, para los materiales dúctiles, como el acero, y suministran valores intermedios entre la fórmula de Galileo y la teoría elástica. Para materiales como el hormigón, que tienen una resistencia a la tracción mucho más pequeña que su resistencia a la compresión, los resultados experimentales están aún más próximos a la teoría de Galileo que las cifras dadas por las teorías plásticas, y son aproximadas a las dadas por la teoría de Mariotte (es necesario ver, sin embargo, que ello es una simple coincidencia y no una prueba de la validez de esta última).

En la tabla anexa se encontrará la comparación entre las diferentes teorías para diferentes formas de la sección transversal; es interesante observar que las diferencias se atenúan para las secciones huecas y para los perfiles utilizados en construcciones metálicas.

Veamos, mientras tanto, cómo resuelve Galileo el problema estático del cálculo de momentos flectores debido a las fuerzas que solicitan la viga. Para este fin utilizó el "principio de la palanca" y toma como primer ejemplo el prisma empotrado en uno de los extremos y libre en el otro, o viga en voladizo. Las figuras de las pgs. 157 y 159 de la "edición nacional" muestran prismas empotrados en paredes (ver también la figura 1 (b) de este artículo). El principio de la palanca es aquí de aplicación inmediata. Si se debe considerar también la acción del peso propio Fg, superpuesta a la de la fuerza F, Galileo dió la regla ("proposición I")

$$F.l + Fg.\frac{l}{2} = (F + \frac{Fg}{2}).l$$

Cuando se comparan vigas en voladizo de sección constante, los momentos debidos a sus pesos propios son proporcionales a los cuadrados de sus longitudes ("proposición III").

El mismo "principio de palanca" lleva a Galileo a las reglas relativas a las vigas sobre dos apoyos. El momento debido al propio peso es igual al de una viga en voladizo de la mitad de la longitud **(1 p. 173)**. Una fuerza concentrada produce el momento máximo cuando se aplica en el punto medio de la luz **(p. 173)**. Cuando las distancias de la fuerza concentrada a los dos apoyos son a y b, Galileo enuncia con claridad **(1 p. 176)** una regla equivalente a la fórmula:

$$\frac{F \cdot a \cdot b}{l}$$

Después de haber deducido una serie de "proposiciones" relacionadas con la influencia de la variación de las dimensiones de una viga sobre su resistencia a la flexión, resuelve el problema de la viga "de igual resistencia" para el caso simple de una viga en voladizo con una carga concentrada. Demuestra que su perfil longitudinal debe ser parabólico para que todas las secciones transversales sean plenamente explotadas. La economía de material en este caso sería ⅓ del volumen de la viga con sección constante **(1, p. 181)** (4).

La parte final de la Segunda Jornada está dedicada al problema de los sólidos huecos, sugerido a Galileo por observaciones empíricas de los "huesos de las patas de pájaro", ligeras y resistentes por ser huecas. Demuestra que, con igualdad de pesos, las vigas de sección hueca son más resistentes que las de sección llena. Se encuentra ya en el libro "Dos Ciencias Nuevas" una justificación teórica de las ventajas de los perfiles ligeros empleados en nuestros días.

En conclusión, puede decirse que un ingeniero, no disponiendo de ningún otro texto que el de Galileo, sería perfectamente capaz de calcular las dimensiones de cualquier viga isostática simple. El error contenido en el coeficiente numérico de la fórmula de flexión de Galileo sería eliminado si este ingeniero se basara en ensayos de flexión de pequeñas vigas de secciones semejantes para determinar la resistencia del material; obtendría así "una tensión de ruptura a la tracción" convencional, afectada del mismo error, como se hace hoy con los ensayos de flexión simple de vigas de hormigón, cuando son interpretados con la ayuda de fórmulas "elásticas" que también encierran un error.

No obstante, es necesario hacer una advertencia a todo el que quiera estudiar directamente los textos originales de Galileo: la terminología que emplea no coincide con la de hoy ni tiene la misma precisión y claridad. Se presta a confusión. En este artículo siempre hemos "traducido" el lenguaje de Galileo al lenguaje técnico moderno y cambiado las notaciones empleadas en las fórmulas.

(4) A pesar de las restricciones de diversos discípulos de Galileo (citados en la nota de la página 170 (1)), esta deducción es perfectamente correcta. Estos discípulos reprochan a Galileo de haber olvidado el peso propio, pero él mismo lo advierte (1 p. 155): "debemos distinguir entre estos dos puntos de vista: cuando consideramos un dispositivo en abstracto, es decir, sin tener en cuenta el peso propio de su material, y cuando se lo restituímos". Para las vigas en voladizo cortas el peso propio es, en general, despreciable comparado con la fuerza F y, por tanto, la forma parabólica aproximativa se justifica.

Por ejemplo, lo que Galileo llama **"momento"** de una fuerza, en su teoría de la flexión, no es lo que hoy se denomina "momento flector", sino el cociente de la división de este último por el "brazo de palanca" de las fuerzas interiores. El "momento" de Galileo tiene, por tanto, las dimensiones de una fuerza concentrada que actúa en la sección transversal, y equilibrada por las tensiones de tracción en el material. Consideremos una palanca que se utiliza para elevar un peso, aplicando en el extremo del brazo más largo una fuerza más pequeña que este peso; el momento de Galileo es igual a esta fuerza multiplicada por la razón entre el brazo más largo y el más corto. Es entonces la fuerza activa ampliada por el "efecto multiplicador" de la palanca o, en otros términos, la fuerza ejercida por la palanca sobre el peso que se quiere levantar.

La fuerza interior equilibrada por las tensiones de tracción del material, igual a M/z, es análoga a este "momento" de palanca. Galileo habla siempre del "momento ejercido por una fuerza para vencer la resistencia de la base del prisma" (es decir, de la sección transversal). No hay que confundir este término técnico empleado por Galileo con el "momento flector" nuestro. A veces, cuando no hay transmisión por una palanca, Galileo designa por el término "momento" simplemente la magnitud de la fuerza.

En vez de escribir la ecuación de equilibrio como nosotros los hacemos $M = Mr$

(es decir, momento flector = momento de las resultantes de las tensiones del material), Galileo dice:

$$\frac{M}{z} = Nr$$

(es decir, momento flector dividido por el "brazo de palanca" de las fuerzas interiores = resultante de las tensiones de tracción del material). Es $\dfrac{M}{z}$, y no M, lo que él llama momento. Es necesario notar que esta forma de presentación de las condiciones de equilibrio es, a veces, utilizada actualmente para el hormigón armado.

Con las explicaciones anteriores, el lector podrá interpretar fácilmente los textos de Galileo con el lenguaje técnico moderno.

4 GALILEO, LA TEORIA DE LA SIMILITUD Y LA TEORIA DE LOS MODELOS.

En la proposición V **(1, p. 162)**, Galileo demuestra que cuando se comparan dos vigas de diferentes dimensiones y **secciones transver-**

sales semejantes, las fuerzas capaces de romperlas en flexión son entre sí como los cubos de las dimensiones transversales homólogas y en proporción inversa de sus longitudes (5).

La demostración de Galileo se aplica tanto a vigas en voladizo como a vigas sobre dos apoyos. Si d es una dimensión transversal y l la longitud, se puede escribir:

$$F \text{ proporcional a } \frac{d^3}{l}$$

$$\text{ó} \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{d_2^3 \cdot l_1}{d_1^3 \cdot l_2}$$

Pasa enseguida a la proposición VI **(1 p. 163)** donde se comparan dos vigas competamente semejantes, desde el punto de vista geométrico, y hechas del mismo material. En este caso, las longitudes guardan entre sí la misma proporción que las dimensiones transversales homólogas. La razón entre el "brazo de palanca" de la fuerza y el "brazo de palanca" de las fuerzas interiores es constante, subraya Galileo. En este caso:

$$F \text{ proporcional a } d^2 \text{ ó a } l^2$$

$$\text{ó} \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_2^2}{l_1^2}$$

En realidad, Galileo va más lejos porque señala que la fuerza F es proporcional "a la resistencia de la base del prisma", es decir, a la resistencia de la viga de tracción simple Nr. Así, la fuerza F no sólo es proporcional al cuadrado de una dimensión de la viga, sino también a la tensión de ruptura del material. Teniendo en cuenta este último factor Galileo va más lejos aún y dice: "Si en un inmenso gigante se quisiera guardar las proporciones de los miembros de un hombre normal sería necesario encontrar un material mucho más duro y resistente" **(1 p. 170)**.

Así, en el caso de dos vigas geométricamente semejantes, fabricadas con materiales diferentes

$$F \text{ proporcional a } l^2 \, \sigma r$$

$$\text{ó} \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{l_2^2 \, \sigma r_2}{l_1^2 \, \sigma r_1}$$

(5) Galileo, en el enunciado de la proposición, habla en forma general de "prismas o cilindros", pero, en la demostración se refiere únicamente a los "cubos de los diámetros de sus bases". Sin embargo, es fácil ver que para secciones transversales no circulares semejantes, debe reemplazarse esta expresión por los "cubos de las dimensiones tranversales homólogas".

Se ve que Galileo llega de esta manera a la conocida ley de similitud que liga el factor de escala de las fuerzas concentradas $\phi = \dfrac{F_2}{F_1}$ al factor de escala geométrica $\lambda = \dfrac{l_2}{l_1}$ y al de las tensiones de ruptura

$$\alpha = \frac{\sigma r_2}{\sigma r_1}$$

$$\phi = \lambda^2 . \alpha$$

Esta ley de similitud puede escribirse también:

$$\frac{F_2}{l_2^2 \quad \sigma r2} = \frac{F_1}{l_1^2 \quad \sigma r1}$$

es decir, el "producto sin dimensiones" $\dfrac{F}{l^2 \sigma r}$

debe tener el mismo valor, en dos vigas geométricamente semejantes, para que se comporten de la misma manera con relación a la ruptura. (6)

Esta condición permite prever la fuerza F_2 capaz de romper la segunda viga por flexión, cuando la fuerza F_1 se conoce para la primera viga; el valor de la fuerza F_2 se obtiene fácilmente de las "proposiciones" de Galileo.

Llegamos ahora a la "proposición VI" **(1 p. 163/164)**, la cual constituye el punto culminante de la Segunda Jornada de "Dos Ciencias Nuevas". Galileo alcanza aquí el fin que se había propuesto al comienzo de la Primera Jornada: la explicación de la "debilidad de los gigantes", es decir, del mal comportamiento de las estructuras geométricamente semejantes a otras estructuras en buenas condiciones, del mismo material, pero realizadas a una escala mayor. Demuestra que el peso propio de vigas geométricamente semejantes crece proporcionalmente a los cubos de las dimensiones homólogas, en tanto que sus resistencias (es decir, las resultantes de las tensiones del material a la ruptura) crecen porporcionalmente a sus cuadrados. Como los "brazos de palanca" guardan entre ellos una relación constante, el

(6) Este *producto sin dimensiones* algunas veces es denominado "*número de Hooke*", pero los autores que así proceden substituyen la tensión de ruptura por el módulo de elasticidad E, lo que conduce a los mismos resultados cuando el diagrama tensión-deformación del segundo material se obtiene simplemente modificando la escala de tensiones. Se tiene, entonces:

$$\frac{E_2}{E_1} = \alpha$$

efecto del propio peso (que Galileo toma igual a M/z) y la resultante de las tensiones de ruptura a la tracción están entre sí "en una proporción sesqui altere" (término antiguo que significa: exponente $\frac{3}{2}$).

Por tanto, si se multiplican todas las dimensiones geométricas por λ, el peso propio queda multiplicado por λ^3, mientras las fuerzas resistentes son multiplicadas únicamente por λ^2. En lenguaje moderno podría decirse que los momentos flectores debidos al peso propio son multiplicados por λ^4, mientras que los momentos de ruptura lo son únicamente por λ^3.

Galileo demuestra, con esta proposición, que todas las veces que se pasa de una estructura a otra geométricamente semejante, pero más grande y construída con el mismo material, la capacidad de resistir a sobrecargas disminuye relativamente llegando a un límite en el cual la estructura falla bajo la sola acción de su propio peso: "la máquina más grande no es proporcionalmente tan fuerte como la más pequeña;... y para toda máquina o estructura, artificial o natural, hay necesariamente un límite que el arte ni la naturaleza pueden sobrepasar... si el material es el mismo y se conservan las proporciones". **(1 p. 51)**.

Si el material es el mismo, y si debe tenerse en cuenta el peso propio, la similitud geométrica no está acompañada de la similitud física: esto es, en efecto, lo dicho por Galileo y traducido al lenguaje moderno.

¿Qué hacer para mantener esta similitud física? Galileo indica una de las soluciones: aumentar proporcionalmente la resistencia del material. Por este medio, el exponente de aumento de la resistencia de la viga en función del factor de escala λ pasará de 2 a 3, llegando a ser igual al del aumento del aumento del peso propio.

Galileo señala una segunda solución: disminuír proporcionalmente el peso específico del material. Por este medio, es el exponente del aumento del peso propio el que disminuye pasando de 3 a 2; así llega a ser igual al del aumento de la resistencia de las vigas.

Conviene transcribir literalmente el texto de "Dos Ciencias Nuevas" en el cual Galileo presenta esta doble solución "para lograr que los gigantes y otros animales muy grandes puedan subsistir...: esto sería posible... no sólo aumentando la resistencia de los huesos y otras partes, cuya función es la de soportar el peso propio y otras cargas: también manteniendo las mismas proporciones de las estructuras óseas, éstas resistirían igualmente... si se reduce el peso específico del material de los huesos en la misma proporción, lo mismo que el peso específico de la carne... **(1 p. 170)**. De este segundo artificio se sirve la naturaleza para producir la estructura de los peces. **(1 p. 170)**.

Reuniendo los dos artificios indicados por Galileo finalmente se obtiene la ley de similitud con relación a la ruptura, que enlaza los factores de escala geométrica, de tensiones de ruptura y de pesos específicos, cuando debe considerarse el peso propio. Se debe aumentar el esfuerzo de ruptura del material o reducir su peso específico para que las resistencias crezcan en la misma proporción que el peso propio, cuando se multiplican todas las dimensiones geométricas por λ.

Esta ley de similitud, descubierta por Galileo, puede escribirse:

$$\frac{l_1}{l_1} = \frac{\sigma r2.\ \gamma_1}{\sigma r1.\ \gamma_2} \quad \text{ó} \quad \frac{\lambda\rho}{\alpha} = 1$$

(γ_1, γ_2: pesos específicos de los dos materiales).

La ley de semejanza de Galileo también puede expresarse

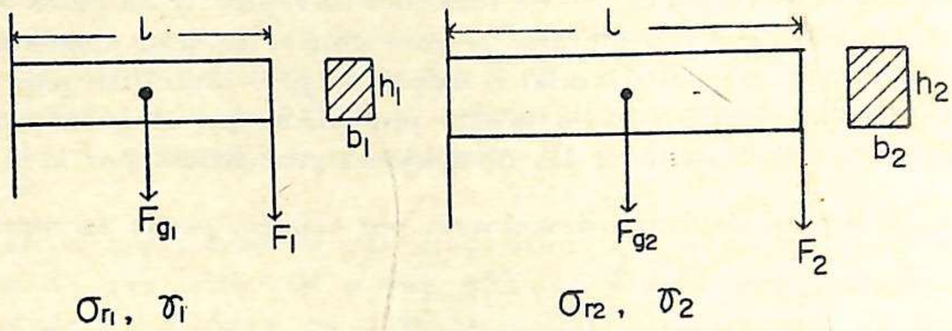
$$\frac{l_2 \cdot\ \gamma_2}{\sigma r_2} = \frac{l_1 \cdot\ \gamma_1}{\sigma r_1}$$

o, en otros términos, el "producto sin dimensiones" $\frac{l.\ \gamma}{\sigma r}$ debe tener el mismo valor para dos vigas geométricamente semejantes para que se comporten de la misma manera, con relación a la ruptura, si se tiene en cuenta el peso propio.

A ejemplo de otros varios "productos sin dimensiones" que se utilizan en la teoría de la similitud y de los modelos y que reciben el nombre de números, tales como los de Newton, de Froude y de Reynolds, propongo que se rinda un homenaje a Galileo, en el 4º centenario de su nacimiento, dando al "producto sin dimensiones" que expresa la ley de semejanza de Galileo el nombre de número de Galileo:

$$\text{NUMERO DE GALILEO} = \text{Gal} = \frac{l.\ \gamma}{\sigma r} \quad \text{(ver figura 2).}$$

Esta ley de semejanza, descubierta por Galileo hace más de tres siglos, se emplea hoy en los laboratorios donde se estudia el comportamiento de las estructuras por el método de los modelos reducidos (16 a 21). Galileo la encontró únicamente para vigas en voladizo o sobre dos apoyos pues no podría haber hecho otra cosa. Actualmente esta ley puede generalizarse a partir de las ecuaciones diferenciales del equilibrio o del cálculo dimensional (21 a 28); y se demuestra que todos los puntos del diagrama tensión-deformación deben obedecer a la escala de tensiones.



$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{b_2}{b_1} = \frac{h_2}{h_1} = \lambda$$

$$\frac{L_1 \cdot \gamma_1}{\sigma_{r1}} = \frac{L_2\, \gamma_2}{\sigma_r} = \text{Nº Galileo} = \text{Gal.}$$

$$\frac{F_1}{\sigma_{r1} L_1^2} = \frac{F}{\sigma_{r2} L^2} \qquad \frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \rho \ ; \ \frac{\sigma_{r2}}{\sigma_{r1}} = \alpha \ ; \ \frac{F_2}{F_1} = \varphi$$

$$\text{Gal.} : \frac{\lambda . \rho}{\alpha} = 1 \qquad \frac{F_2}{F_1} = \frac{F_{g2}}{F_{g1}} = \lambda^3 . \rho = \lambda^2 . \alpha$$

Figura No. 2

Ley de similitud con relación a la ruptura, según Galileo

σr: **tensión de ruptura**

γ: **peso específico**

Todas las veces que sea necesario tener en cuenta el peso propio lo mismo que otras fuerzas de masa como la presión del agua en las presas o el empuje de la tierra, la condición establecida por Galileo debe ser respetada, lo cual hace difícil a menudo la escogencia del material del modelo. Sería necesario, entonces, fabricar el modelo reducido con un material menos resistente que el del prototipo y, por consiguiente, la curva tensión-deformación conserva en todos sus puntos la proporción $\sigma_1 = \sigma_2/\alpha$, siendo las deformaciones unitarias ($\varepsilon_1 = \varepsilon_2$). (7) No siendo suficiente esta condición, sería necesario todavía aumentar artificialmente el peso propio del modelo, de una manera semejante a la que resultaría al aumentar el peso específico del material. Cuando las estructuras están compuestas de elementos de poco espesor, este último artificio es fácilmente aplicable por medio de pesos adicionales. En los modelos de presas, por ejemplo, se emplean algunas veces líquidos de gran peso específico, como el mercurio.

Cuando se lee la obra de Galileo se ve que no sólo encontró leyes de similitud en la Resistencia de Materiales. En la figura 3 de este artículo se ven los ejemplos del péndulo simple, del plano inclinado y de las cuerdas vibrantes, problemas tratados siempre por Galileo desde el punto de vista de la similitud estableciendo las diferentes proporciones relativas de las intensidades de los fenómenos, sin determinar todas las veces coeficientes numéricos de las ecuaciones que expresan las leyes. Sus experiencias con planos inclinados eran, en realidad, ensayos análogos a los ensayos de modelos: no pudiendo medir con rigor el tiempo de caída vertical, muy rápido en relación a los medios de que disponía, pensó lo que es ya genial, en "atenuar el fenómeno" reduciendo artificialmente la aceleración y haciendo de este modo las medidas practicables. Otro ejemplo interesante es el método que indica en la Primera Jornada **(1 p. 140)** para determinar la longitud de una cuerda muy larga suspendida por el extremo superior de una alta torre. Se ata un peso en el extremo inferior de la cuerda y el tiempo de oscilación del péndulo formado se compara con el de un pequeño

(7) Cuando se realizan ensayos estáticos de estructuras en las cuales no existen fenómenos de inestabilidad de equilibrio no es indispensable la semejanza de las deformaciones con la misma escala geométrica del modelo. En este caso, se puede emplear un material cuya curva tensión-deformación esté ligada a la del prototipo por las relaciones:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_2}{\alpha} \quad \epsilon_1 = \frac{\epsilon_2}{\beta} \quad \text{o sea } E_1 = \frac{\beta}{\alpha} E_2.$$

Si el peso propio es despreciable, la condición de Galileo no es obligatoria, siendo suficiente respetar la ley de la escala de las fuerzas concentradas:

$$\phi = \lambda^2 \cdot \alpha$$

péndulo de longitud conocida. La ley de similitud del péndulo simple suministra inmediatamente la longitud de la cuerda larga. En este caso, la pequeña cuerda es el modelo, y la larga, el prototipo; los dos períodos de oscilación las caracterizan, y la magnitud por determinar es la longitud del prototipo.

5 GALILEO Y LA NOCION DE "TAMAÑO LIMITE". LA "DEBILIDAD DE LOS GIGANTES".

Habiendo deducido las leyes de semejanza, con relación a la ruptura, Galileo trata inmediatamente la noción de "tamaño-límite". "Entre todos los prismas o cilindros pesados hayuno y sólo uno que bajo la acción de su peso propio se encuentra justo en el límite entre la ruptura y la no-ruptura; por lo tanto, todos los más grandes que éste, incapaces de resistir su propio peso, fallan, mientras que todos los más pequeños son capaces de resistir alguna fuerza adicional". Proposición VII, **(1 p. 165)**.

Deduce, de manera correcta, la ley según la cual se deben aumentar las dimensiones transversales en una proporción mayor que el aumento de las dimensiones longitudinales (luces) para que las vigas conserven la misma resistencia relativa respecto a su propio peso. El factor λ_1 de aumento de las dimensiones transversales debe ser igual al cuadrado del factor λ de aumento de las luces:

$$\lambda_1 = \lambda^2$$

Esta regla es aplicable a las estructuras diseñadas como "lineales", compuestas de piezas alargadas, cuando la resistencia a la flexión es decisiva; se supone que todas las cargas diferentes del peso propio crecen en la misma proporción que este peso, es decir:

$$\lambda \cdot \lambda_1 = \lambda^5$$

Así se encuentra ya en "Dos Ciencias Nuevas" la idea de lo que hoy se llama "modelos distorsionados": la "escala" transversal es diferente de la "escala" longitudinal. Proposición VIII **(1, p. 166 a 169)**.

Basándose en estas dos proposiciones, Galileo hizo una incursión sorprendente en el dominio biológico: "Se puede ver claramente, pues esto ha sido demostrado, la imposibilidad de aumentar las estructuras hasta vastas dimensiones, sea en el arte, sea en la naturaleza; sería así imposible fabricar barcos, palacios o templos excesivamente grandes cuyos remos, antenas, vigas, cadenas de hierro y, en fin, todas las otras partes estuviesen juntas; ni la naturaleza puede producir árboles de tamaño desmesurado porque sus ramas cederían bajo la acción de su propio peso; y sería igualmente imposible hacer estructuras óseas pa-

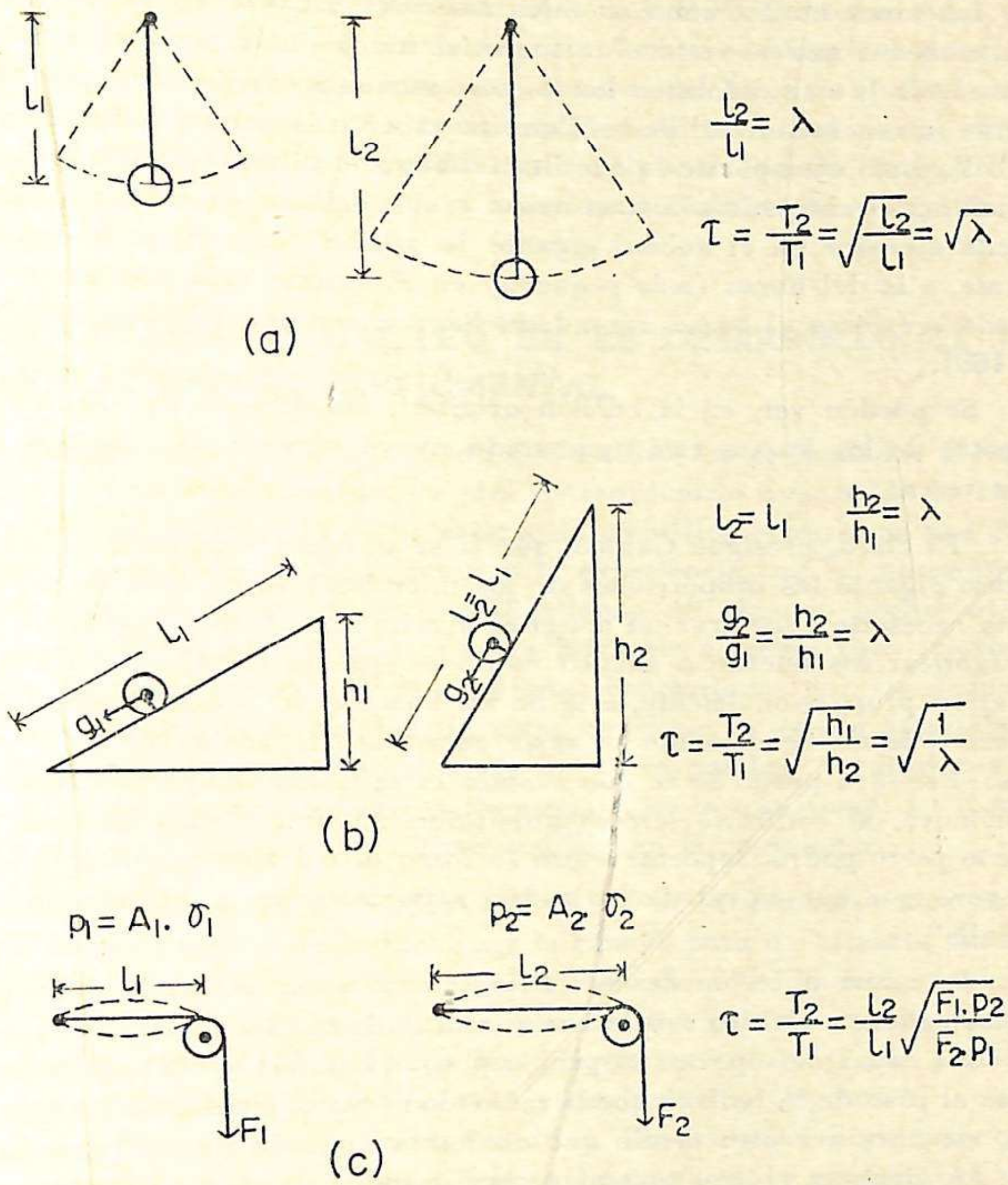


Figura No. 3

(a): péndulo simple (1, p. 139/140)

(b): plano inclinado de longitud constante y pendiente variable (1, p. 219/220)

(c): Cuerdas en vibración (1, p. 143 a 146)
p = peso de la cuerda por unidad de longitud.

ra hombres, caballos u otros animales capaces de subsistir y ejercer sus funciones normalmente si tales animales alcanzaran tallas inmensas, a menos que se emplee un material mucho más duro y resistente que el usual, o se deformen los huesos, aumentando desproporcionadamente su espesor, de tal manera que su aspecto llegara a ser monstruoso". Y, como ejemplo de lo que llevo dicho, he dibujado aquí la figura de un hueso alargado sólo tres veces y ensanchado de tal manera que pueda ejerecer en el animal gigante la misma función, proporcionalmente, a la del hueso (más pequeño) en el animal más pequeño; y se puede ver cómo el hueso agrandado llega a ser desproporcionado" **(1 p. 169)**.

Se pueden ver, en la edición original, los dibujos de Galileo: el espesor de los huesos está aumentado nueve veces y la longitud sólo tres veces.

"Es claro, prosigue Galileo, que si se quisiera mantener en un inmenso gigante las proporciones de los miembros de un hombre normal sería necesario encontrar un material mucho más duro y resistente para fabricar sus huesos, o admitir entonces que su fortaleza sería muy inferior, proporcionalmente, a la de un hombre de pequeño tamaño; y si crece desmesuradamente se vería caer bajo la acción de su propio peso. Por otra parte, se ve que cuando la talla disminuye la fuerza no disminuye, al contrario, crece proporcionalmente. Pienso que un pequeño perro podría soportar sobre su lomo dos o tres perros iguales a él, pero creo que un caballo no podría soportar sobre sí el peso de otro caballo".

Ante una objeción de Simplicio, en relación al inmenso tamaño de las ballenas, Galileo señala que si una ballena fuera sacada del agua no sería capaz de soportar su propio peso. **(1 p. 171 - 172)**, pues en el agua el peso de la ballena queda reducido: "Su objeción, Señor Simplicio, me hace ver otro medio que no había anotado antes, para hacer que los gigantes y otros animales muy grandes puedan subsistir y moverse como los más pequeños; esto sería posible no sólo aumentando la resistencia de los huesos y de las otras partes, cuya función es la de soportar el peso propio y otras cargas; sino si manteniendo las mismas proporciones de la estructura ósea, se reduce el peso específico del material de los huesos en la misma proporción, lo mismo que el peso específico de la carne y de todo lo que deba apoyarse en los huesos. De este segundo artificio se sirve la naturaleza para producir la estructura de los peces volviendo sus huesos y su carne no sólo muy livianos sino aún sin ningún peso" **(1 p. 170)**.

Estas consideracioses de Galileo sobre la "debilidad de los gigantes" representan una prueba más de su genio universal, y es perfectamente justa la observación hecha en la UNESCO por Paulo Carneiro, con motivo de las conmemoraciones del IV Centenario del nacimiento de Galileo: "Así como Augusto Comte consideró el principio Galiléico de la relatividad como una ley general de la naturaleza aplicable a todos los fenómenos, comprendidos allí los (fenómenos) sociales, se podría, asimismo, extender las conclusiones de Galileo sobre la debilidad de los gigantes a los organismos económicos y políticos". (15).

6 INFLUENCIA DE GALILEO EN EL DESARROLLO DE LA INVESTIGACION EXPERIMENTAL.

Puede decirse sin exageración que Galileo fue el fundador del método experimental, fundamento del extraordinario avance de la ciencia moderna. Su método de investigación científica consiste en una justa combinación de la observación y la experiencia con la matemática, instrumento de lógica deductiva. Partiendo de algunos hechos experimentales se construye una primera hipótesis o teoría para interpretarlos. De esta teoría se deducen ciertas conclusiones por vía deductiva; a continuación la validez de estas conclusiones queda sometida a la experiencia la cual tiene siempre la última palabra. La hipótesis es reemplazada o perfeccionada si los ensayos no la confirman. La fuente de verdad está siempre, en último análisis, en la experiencia.

Este continuo recurso al veredicto de la experiencia exige colaboración permanente de la técnica y la ciencia pura o abstracta. La actividad de Galileo como investigador durante toda su vida lo hace siempre descollar. Quienes deseen profundizar en esta cuestión deberían leer las obras indicadas en las referencias 9 a 14 y más particularmente los análisis contenidos en la de Ludovico Geymonat, lo mismo que la Introducción y las notas de A. Carugo y L. Geymonat, que acompañan el texto de "Dos Ciencias Nuevas" en la edición **(1)**. Se encuentra allí una refutación completa y documentada de ciertas tesis, como la de Alexandre Koyré, que pretende negar la naturaleza experimental de los métodos de Galileo.

Galileo describe, con lujo de detalles, en la Segunda Jornada de "Dos Ciencias Nuevas", las repetidas experiencias que hizo con planos inclinados con el fin de verificar la ley de la caída de los cuerpos **(1 pp. 212 y 213)**. Todos los investigadores podrían tomar estas dos páginas admirables como modelo.

A partir de 1599, Galileo instaló en su casa un pequeño taller de mecánica con un obrero especializado permanente. Allí fabricaba instrumentos que utilizaba en sus investigaciones o que vendía para aliviar sus dificultades financieras. Cuando se visita el Museo de Historia de la Ciencia de Florencia se ven allí varios instrumentos fabricados y utilizados por Galileo, tales como dos ejemplares de su famoso telescopio, que no acabó de perfeccionar; un termómetro rudimentario, primera tentativa hecha en el mundo para medir la temperatura; un modelo en madera de una máquina que inventó para elevar el agua; el "compás geométrico y militar", precursor de la moderna regla de cálculo, para uso de ingenieros y militares. Galileo inventó también la "bilancetta", balanza hidrostática para determinar las densidades, y fue el primero en aplicar el péndulo, cuyas leyes había estudiado, al reloj. Galileo se ocupó a menudo de problemas de ingeniería y construcción mecánica y naval, sobre todo, durante el período que residió en Padua, en relación con las actividades del Arsenal de Venecia. Escribió un "Tratado de Fortificaciones o de la Arquitectura Militar" e hizo estudios sobre la regularización del cauce del río Bisencio. Es necesario agregar a esta enumeración de las actividades técnicas de Galileo su deseo soñado de encontrar aplicación práctica a su descubrimiento de los satélites de Júpiter en vista de la determinación de longitudes.

El ejemplo de Galileo fue fecundo. Fue uno de los miembros más importantes de la Academia de los Linces ("Academia dei Lincei"). Después de su muerte, el Duque de Toscana y su hermano Leopoldo fundaron, en compañía de otros discípulos de Galileo, la famosa "Academia de Experiencias" ("Academia del Cimento"), que fue la primera institución consagrada sistemáticamente a la investigación científica y, además, sirvió de modelo a las academias francesa, inglesa y alemana. En una de las alas del palacio Pitti de Florencia, y en un pabellón del Jardín Boboli, los miembros de la Academia instalaron el primer laboratorio del mundo de investigaciones científicas y tecnológicas donde prosiguieron los trabajos de Galileo **(12 pp. 83 a 89)**.

En el dominio de la Resistencia de Materiales sus discípulos Viviani, Marchetti y el francés Blondel, continuaron su obra. Este último fue nombrado por Luis XIV Director de Obras Públicas de la ciudad de París **(1 nota p. 181)**. A menos de 40 años después de la muerte de Galileo, Mariotte hacía, en presencia de Carcavy, Roberval y Huyghens, experiencias para verificar la razón entre la resistencia a la flexión y la resistencia a la tracción simple, lo que lo llevó a proponer el cambio del coeficiente numérico ½ de la fórmula galiléica por el coeficiente ⅓ (en el caso de una sección rectangular) **(1 nota p. 181)**.

Como bien lo ha dicho Timoshenko, con Galileo comenzó la historia de la ciencia de la Resistencia de los Materiales. Y con Galileo nació la verdadera investigación científica moderna.

7 CONCLUSION.

Cuando se leen los textos de Galileo sobre Resistencia de Materiales lo que llama la atención es su actualidad. Estos textos no son anticuados. Se puede decir, asímismo, que son más actuales en nuestros días que en el siglo pasado, o al comienzo de este, cuando el estudio de las estructuras desde el punto de vista de la ruptura, adoptado por Galileo y vuelto a adoptar hoy, estaba oscurecido por el abuso de las teorías elásticas. Fundador de la Resistencia de Materiales, como bien lo ha dicho Timoshenko, Galileo fue también el precursor de la teoría de los modelos y de la similitud, poderoso instrumento de investigación cada día más utilizado.

BIBLIOGRAFIA SOBRE GALILEO

1. **Galileo Galilei** - Discorsi e Dismostrazioni Matematiche intorno a Due Nuove Scienze- a cura di Adriano Carugo e Ludovico Geymonat. Boringhieri, Torino, 1958.

2. **Galileo Galilei** - Dialogues concerning Two New Sciences - translated by Henry Crew and Alfonso de Salvio. Dover Publications, New York, 1914.

3. **Timoshenko,** S.P. - History of Strength of Materials, McGraw Hill, 1953.

4. **Hamilton,** Stanley Baines - The historical development of structural Theory. Proceedings of the Institute of Civil Engineering, 1952.

5. **L'Hermite,** R. - Résistance des Matériaux Théorique et Expérimentale. Dunod, París, 1954.

6. **Truesdell,** C. - Outline of the History of flexible or elastic Bodies to 1788. Journal of the American Acoustical Society, vol. 32, n. 12.

7. **L'Hermite,** R- Que savons-nous de la résistance du béton? Revue Travaux, juin 1954, París.

8. **L'Hermite,** R. - Traité d'Expertise et d'Essais des Matériaux et des Constructions. Eyrolles, París, 1959.

9. **Geymonat,** Ludovico - Galileo Galilei. Einaudi, Torino, 1957.

10. **Banfi,** Antonio - Vita di Galileo Galilei. Feltrinelli, Milano, 1962.

11. **Santillana,** G.; **Zagar,** F.; **Geymonat,** L.; **Teani,** R.; **Bulferetti,** L.; **Morandi,** L. - Fortuna di Galileo. Laterza, Bari, 1964.

12. **Mostra di documenti Galileani** - a cura di Maria Luisa Bonelli. Barbera, Firenze, 1964.

13. **Maccagni,** Carlo - Galileo Galilei - Un regard nouveau sur l'univers - Le Courrier UNESCO, 1964.

14. **Galilée** - Sidereus Nuncius (Le message céleste), texte établi par Emile Namer Gauthier-Villar s, París, 1964.

15. **Carneiro,** Paulo E.B. (Ambassadeur du Brésil auprés de l' UNESCO). Discours prononcé á l'occasion de la commémoration du IV centenaire de la naissance de Galilée au siége de l'UNESCO a París, 1964.

BIBLIOGRAFIA sobre los ensayos de modelos estructurales

16. **Rocha,** Manuel - Dimensionnement expérimental des constructions. Annales de l' I. T. B. T. P. París, Février 1952.

17. **Oberti,** G. - Essai sur modéle á grande échelle au delá de la limite élastique. Bulletin RILEM n. 7, París, 1960.

18. **Ferry-Borges,** J. - Théories statistiques de la similitude des structures. Bulletin RILEM n. 7, París, 1960.

19. **Mattock,** A.M. - Structural Models Testing. Journal of the Portland Cement Association, USA 1962.

20. **Serafim,** J. L.; **Poole da Costa,** J. - Metodos e Materiais para o estudo em modelos das tensoes devidas ao peso proprio em barragens LNEC, Lisboa, 1960.

21. **Nazarov,** A. - Théorie de la similitude mécanique des solides déformables. Bulletin RILEM n. 7, París, 1960.

BIBLIOGRAFIA sobre el cálculo dimensional

22. **Langhaar,** H. L. - Analyse dimensionnelle et théorie des maquettes. Trad. C. Charcosset. Dunod, París, 1956.

23. **Palacios,** J. - Analyse dimensionnelle. Trad. J. Prevot. Gauthier - Villars, París, 1960.

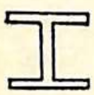
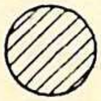
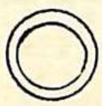
24. **Fourier** - Théorie analytique de la chaleur. París, 1822.

25. **Comte,** Auguste - Cours de Philosophie Positive, Tome Premier, 5éme lecon, París, 1830. Géométrie Analytique, Premiére Partie, chap. 1; n. 12 et 13, París, 1843.

26. **Beaujoint,** N. - Similitude et théorie des modéles. Bulletin RILEM n. 7, París.

27. **Sedov,** L. I. - Similarity and dimensional methods in mechanics. Inofsearch, London, 1959.

28. **Pankhurst,** R. C. - Dimensional analysis and scale factors. Chapmann and Hall, London, 1964.

	GALILEO	MARIOTTE	T. PLAST.	T. ELAST.
	σ_r	σ_r	σ_r	σ_r
	K = 1/2	1/3	1/4	1/6
	K = 1/2	1/2,3	1/2,5	1/2.8
	K = 1/2	1/3,14	1/4,72	1/8
	K = 1/2	1/2,67	1/3,14	1/4

$$M_r = K(N_r . h) = K(A.h.\sigma_r)$$

ANEXO

Tabla comparativa