

LAS CIENCIAS INGENIERILES COMO «CIENCIAS PARA LA APLICACIÓN». EL CASO DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES

ANA CUEVAS BADALLO

Universidad de Salamanca

Dpto. Filosofía y Lógica y Filosofía de la Ciencia

acuevas@usal.es

Resumen: La definición de tecnología como ciencia aplicada no es válida, si con ella entendemos que la tecnología consiste en transformar conocimientos abstractos desarrollados por la ciencia en «artefactos tecnológicos». La naturaleza de tal proceso de aplicación no ha recibido hasta la fecha una definición satisfactoria. Los conocimientos necesarios para que se produzcan las innovaciones tecnológicas pueden provenir, como de hecho lo hacen, de investigaciones realizadas por los propios tecnólogos. Estos conocimientos se organizan en teorías con características peculiares, determinadas por su orientación hacia un objetivo práctico. Por ello parece más adecuado hablar de «ciencias para la aplicación» en lugar de «ciencias aplicadas». Aquí se estudia el caso de la Resistencia de Materiales, un ejemplo paradigmático de «ciencia para la aplicación».

Abstract: The current definition of technology as applied science is not useful at all. This meaning comes from the received view which understands technology as the transformation of abstract knowledge from basic sciences in «technological artefacts». Nobody has ever correctly described the mechanism of this sort of application. Technologists are able to develop –and develop indeed– their own specific knowledge with the aim of making innovations. This specific technological knowledge is organized in theories whose characteristic features are constrained by their practical goal. Therefore it seems more appropriate to use «sciences for application» instead of «applied sciences». Here I analyse the case of Strength of Materials, a paradigmatic example of «science for application».

INTRODUCCIÓN

Cualquier intento que hagamos por comprender qué es la tecnología se encuentra, en primer lugar, con la definición de ésta como ciencia aplicada. La ciencia lleva a cabo complicadas investigaciones que dan como resultado nuevos conocimientos. El coste de estas investigaciones se justifica porque al final, la mayor parte de ellas podrán aplicarse tecnológicamente, es decir, se creará un nuevo aparato o se mejorarán los que poseemos. De esta manera se cierra el círculo: la sociedad invierte en ciencia, la ciencia reporta beneficios tecnológicos para la sociedad. Lo ideal sería conocer cómo funciona el mecanismo de aplicación, de forma que supiéramos de qué investigaciones se obtienen rendimientos prácticos y de cuáles no. Una preocupación muy similar a ésta animó la realización del estudio *TRACES* (realizado por el *Illinois Institute of Technology*, 1968) y el proyecto *Hindsight* (desarrollado por Sherwin e Isenson, 1967)¹. Estos análisis tenían un carácter retrospectivo e intentaban identificar aquellos conocimientos que resultaban de la investigación básica y que contribuían a la creación de innovaciones concretas. La conclusión a la que llegaron fue muy parecida: dos terceras partes del conocimiento usado por la industria en la innovación se derivaban de las inversiones en I+D realizadas por las propias empresas y de aquellos conocimientos que resultaban de la experiencia de los ingenieros. La otra parte tenía un origen externo, que podía provenir de conocimientos proporcionados por otras compañías, por los usuarios, los distribuidores y la competencia, dejando sólo un pequeño margen (entre el 5 y el 20%, según sectores) a las contribuciones de los laboratorios académicos y gubernamentales. Las conclusiones que se extrajeron de estos estudios fueron varias: en primer lugar, parecía que la traducción de nuevos conocimientos científicos en innovaciones tecnológicas era un fenómeno mucho más complejo de lo que en principio se creía; en segundo, la relación entre el mundo académico y la investigación industrial no era ni obvia ni directa; y en tercer lugar, si bien las innovaciones demandaban conocimientos, estos tenían generalmente un origen interno a las empresas. Otros estudios posteriores y con objetivos similares fueron realizados por M. Gibbons y R. Johnston (1974) y por W. Faulkner, J. Senker y L. Velho (1994) en donde se llegaban a conclusiones parecidas. Las empresas emplean conocimientos de muy diversas fuentes, aunque la mayor parte

¹ Rothwell, R. (1977).

de los que se usan en la innovación tiene su origen en fuentes propiamente tecnológicas, asociadas con las actividades de diseño y de I+D. Asimismo, se confirmaba que la contribución externa más significativa, aquella que provenía de la investigación universitaria, tenía una influencia mayor sobre las investigaciones desarrolladas en los laboratorios de I+D de las empresas que sobre las fases de diseño y desarrollo. De esta manera, si existía alguna influencia de la ciencia sobre la tecnología, ésta no se vertía directamente sobre la producción de nuevos artefactos, sino que abría nuevas posibilidades sobre las que los tecnólogos de los laboratorios podían trabajar.

A la luz de estos resultados la pregunta es obvia ¿es lícito seguir manteniendo que la tecnología es ciencia aplicada? Antes de responder veamos cuál es el origen de esta definición.

2. EL SURGIMIENTO DE UN TÓPICO

La idea de que la tecnología es ciencia aplicada no es demasiado antigua, como muy bien han mostrado E. T. Layton (1976), N. Rosenberg y R. Nelson (1994) y R. Kline (1995). Layton y Kline llegan a resultados similares en sus estudios. En 1880 los científicos y los ingenieros comenzaron a utilizar el término *ciencia pura*, para sustituir a otros conceptos usados anteriormente como *ciencia fundamental* o *básica*, al tiempo que introducían (con la carga epistemológica y valorativa que los nuevos adjetivos traían consigo) el de *ciencia aplicada*, con el que se hacía referencia a las artes mecánicas y a las artes útiles. Al mismo tiempo, el último término insinuaba que los conocimientos necesarios para desarrollar la tecnología no eran aquellas habilidades adquiridas por los artesanos en el desarrollo de sus actividades, sino un conocimiento técnico obtenido académicamente, en relación con la ciencia o mediante la aplicación del método científico. Durante las primeras décadas del siglo XX, el panorama se complicó al aparecer en escena la *investigación industrial*, desarrollada por científicos e ingenieros en los laboratorios de investigación de las grandes empresas. Se entabló un debate entre aquellos que estaban a favor y los que estaban en contra de mantener los conceptos de *ciencia pura* y *ciencia aplicada*. Kline y Layton apuntan que los motivos por los que se defendía una u otra postura eran de carácter más bien espurio. Los que estaban a favor de mantenerlos eran o científicos que pretendían que se aumentasen las inversiones en ciencia pura, o bien ingenieros que querían elevar su

estatus profesional. Los que no estaban de acuerdo querían promover la autonomía de la investigación industrial y la investigación ingenieril, que daban como resultado nuevos conocimientos relativamente autónomos de las ciencias *básicas* o *puras*. El colofón a este debate lo puso Vannevar Bush, uno de los ingenieros que participaron en el proyecto Manhattan, con su trabajo *Science, The Endless Frontier* (1945)². Allí se afirmaba que el modelo lineal era el que mejor representaba las relaciones que existían entre la ciencia y la tecnología, de carácter simbiótico, siendo la tecnología una especie de parásito intelectual de la ciencia.

3. LA CIENCIA APLICADA EN LA FILOSOFÍA

Esta idea ha prosperado notablemente y podría incluso decirse que forma parte del conocimiento popular. Se suele considerar que en la filosofía ha recibido un cierto respaldo gracias a M. Bunge (1966), aunque hay que matizar este punto, ya que la propuesta de Bunge es más sofisticada de lo que podría parecer en un principio. En el artículo de 1966 señala que es inadecuado equiparar tecnología con ciencia aplicada, ya que ésta última es el resultado de aplicar el método científico o teorías de la ciencia con fines prácticos, mientras que la tecnología consta además de otros elementos. La aplicación de las teorías científicas sirve de base para la elaboración de un sistema de reglas que prescriben el curso de la acción práctica óptima³. La tecnología también puede desarrollar sus propias teorías, las cuales pueden ser sustantivas y operativas. La primeras son «esencialmente aplicaciones de teorías científicas a situaciones aproximadamente reales (...). Las teorías tecnológicas operativas, en cambio, se refieren desde el primer momento a las operaciones de complejos hombre-máquina en situaciones aproximadamente reales. (...) Las teorías tecnológicas sustantivas tienen siempre inmediatamente a sus espaldas teorías científicas, mientras que las teorías operativas nacen en la investigación aplicada y pueden tener poco

² «Basic research leads to new knowledge. It provides scientific capital. It creates the fun from which the practical applications of knowledge must be drawn. New products and new processes do not appear full-grown. They are founded on new principles and new conceptions, which in turn are painstakingly developed by research in the purest realms of science. Today, it is true ever that basic research is the pacemaker of technological progress». Bush, V. (1945), p. 12-13.

³ Bunge, M. (1969).

—o nada— que ver con teorías sustantivas⁴. Estas teorías emplean el método de la ciencia y «pueden considerarse científicas y dirigidas al tema de la acción: son, dicho brevemente, teorías de la acción. Son teorías tecnológicas respecto del objetivo, que es más práctico que cognoscitivo; pero, aparte de eso, no difieren grandemente de las teorías de la ciencia»⁵. También señala Bunge una serie de propiedades que cumplen estas teorías: (i) tratan sobre modelos idealizados de la realidad; (ii) emplean conceptos teóricos; (iii) utilizan la información empírica y permiten realizar predicciones; (iv) son empíricamente contrastables, aunque no tan rigurosamente como lo tienen que ser las teorías científicas. Desde el punto de vista práctico, las teorías tecnológicas son más relevantes que las teorías científicas, aunque desde el punto de vista conceptual las teorías tecnológicas son más pobres que las de la ciencia. Ello se debe a que deben ser concebidas para que los tecnólogos las empleen y ellos se interesan por los efectos controlables a escala humana. Una teoría demasiado complicada puede resultar ineficaz a la hora de obtener resultados prácticos.

Como puede verse, las teorías tecnológicas que propiamente pueden denominarse *ciencia aplicada* según Bunge, son las teorías sustantivas, mientras que las teorías operativas, gracias a la utilización del método científico obtienen su propio corpus de conocimiento, más sencillo en función de su objetivo práctico, pero con características similares al de cualquier teoría de las ciencias denominadas *puras*. De esta manera se está reconociendo que los tecnólogos pueden desarrollar sus propios conocimientos teóricos cuando les sea necesario aplicando únicamente el método de la ciencia y no sus contenidos. La tecnología puede realizar investigaciones que dan como resultado teorías operativas, pobres conceptualmente, pero ricas desde el punto de vista práctico. A pesar de este reconocimiento explícito de la existencia de un conocimiento teórico propiamente tecnológico, Bunge es más citado por su afirmación de que las teorías tecnológicas sustantivas resultan de la aplicación de las teorías científicas.

Desde la epistemología, varios autores han intentado matizar esta propuesta de Bunge. L. Tondl⁶, J. Agassi⁷, I. Niiniluoto⁸ y F. Rapp⁹, a

⁴ Bunge, M. (1969), p. 684.

⁵ Bunge, M. (1969), p. 685.

⁶ Tondl, I. (1974): «On the Concepts of «Technology» and «Technological Sciences» in F. Rapp (Ed.) (1974): 1-18.

⁷ Agassi, J. (1980).

pesar de ciertas diferencias de enfoque, coinciden en que la tecnología es capaz de desarrollar investigaciones de carácter teórico o fundamental y que no son el resultado de aplicar teorías científicas. Para ello, emplean el método científico, se expresan en lenguaje matemático, utilizan modelos teóricos descriptivos así como información empírica, y tienen una función tanto descriptiva como predictiva. Además, una última característica en la que también están de acuerdo, tiene un objetivo eminentemente práctico: sobre la base de esos conocimientos se han de poder resolver problemas característicamente tecnológicos. Esta circunstancia es muy importante ya que parece determinar su diferencia con la ciencia básica.

Una vez que se acepta la existencia de esta forma de conocimiento especial, y tomando como punto de partida las aproximaciones anteriores, parece necesario proponer una caracterización completa de estas ciencias tecnológicas. Para ello, puede ser interesante analizar las propiedades epistemológicas de una de esas ciencias. Aquí se ha escogido la resistencia de materiales, una teoría típicamente ingenieril, con un gran desarrollo y amplia utilización en diversos sectores. A continuación se desarrollará un estudio histórico acerca de sus orígenes y un análisis epistemológico de sus principales características¹⁰.

4. ORIGEN HISTÓRICO DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES

El estudio histórico sobre los fundadores de la resistencia de materiales ilustra, como se verá a continuación, que todos ellos, bien fuesen científicos o ingenieros, compartían una misma preocupación por la solución de problemas prácticos, que generalmente les habían surgido en el desarrollo de sus trabajos. La necesidad de un conocimiento fundamentado sobre el comportamiento y las propiedades de los materiales dio lugar a esta teoría ingenieril, una de las más desarrolladas y consolidadas.

Durante los siglos XVIII y XIX aparecieron un conjunto de nuevas ciencias que no parecían encajar demasiado bien ni en la categoría de conocimientos operativos, hasta ese momento característicos de la técnica, ni en el conjunto de las ciencias naturales. Las sociedades científicas

⁸ Niiniluoto, I. (1995).

⁹ Rapp, F. (1981).

¹⁰ Este trabajo se ha realizado por extenso en mi tesis doctoral: Cuevas, A. (2000).

ficas jugaron un papel fundamental en su aparición, haciendo posible el intercambio de ideas, métodos y conocimientos entre personas con formación académica, autodidactas, técnicos y artesanos. Todo aquel que tuviese alguna habilidad especial que sirviese a la causa de comprender el funcionamiento del mundo era bien recibido. En este ambiente surgieron las ciencias naturales y se sentaron las bases para la aparición de las ingenieriles. La astronomía y la física fueron las primeras en adoptar una estructura característica y paradigmática, siendo pioneras en el método y en la forma de exposición. Sirvieron de modelo para los desarrollos científicos posteriores de otras ciencias naturales y también de las ciencias ingenieriles. Estas últimas se institucionalizaron durante el siglo XIX, creando sus propios centros de enseñanza, sus institutos técnicos, sus sociedades profesionales y sus publicaciones¹¹.

En cuanto a la teoría que nos ocupa, se suele considerar a Galileo como el primero en darse cuenta de la necesidad de realizar estudios sistemáticos sobre los materiales, siendo una de las ciencias que aparecen en su trabajo *Discurso sobre las dos nuevas Ciencias*¹². Su interés surgió durante una visita al arsenal veneciano, en donde tuvo ocasión de observar a los artesanos en su trabajo y conversar con ellos. La fabricación de barcos requería de conocimientos que evitasen la fractura bajo la acción del propio peso, para lo que se empleaban maquetas, reproducciones a escala de dichos barcos. Con la intención de comprender porqué estructuras geoméricamente similares, al incrementar su dimensiones se vuelven cada vez más débiles, Galileo desarrolló una serie de métodos experimentales, de los que pudo concluir ciertas leyes que habrían de cumplir todos los materiales. Aunque esas leyes no son del todo correctas, Galileo estaba sentando los cimientos del estudio teórico de los materiales y las estructuras de construcción, empleando para ello, al igual que en cualquier otra ciencia, el método experimental y el lenguaje matemático.

Otro de los pioneros en el estudio de la resistencia de materiales fue Robert Hooke, *curator* de la *Royal Society* desde su fundación y colaborador de Boyle. Nunca fue propiamente un científico y el único título académico que obtuvo fue el de *Master of Arts*. Sus intereses siempre estuvieron inclinados hacia cuestiones prácticas, demostrando du-

¹¹ Channell, D. F. (1989): *The History of Engineering Science. A New Annotated Bibliography*, Garland, New York.

¹² Galileo Galilei (1638): *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nouue scienze. Attenenti alla Meccanica & i Movimenti Locali*.

rante su vida una gran capacidad para la invención de aparatos. Su principal aportación a la teoría es la ley que lleva su nombre, derivada de su estudio del comportamiento de ciertas espirales elásticas, y que señala la proporcionalidad que existe entre la magnitud de las fuerzas y las deformaciones que ellas producen. El interés de Hooke se hallaba relacionado, sobre todo, con las aplicaciones de este descubrimiento en la caracterización de elementos de construcción, tanto naturales como artificiales y de los que no se tenía un conocimiento demasiado preciso acerca de las causas de su comportamiento.

Mariotte, científico francés contemporáneo de Hooke, también se interesó por los problemas de la elasticidad y de la resistencia de materiales, preocupación que surgió a partir de su trabajo sobre fluidos y construcción de fuentes: *Traite du mouvement des eaux et des autres corps fluides* (1686). En sus experimentos con barras de madera y cristal descubrió que las medidas proporcionadas por Galileo eran exageradas, por lo que se propuso proporcionar medidas más exactas con ayuda del método experimental.

Otra de las figuras clave en la historia de la resistencia de materiales fue Coulomb, que, a pesar de ser más conocido por sus trabajos sobre electricidad y magnetismo, desarrolló la mayor parte de su trabajo como ingeniero. Durante sus años de destino militar en la isla de La Martinica trabajó en la construcción de fortificaciones y otras estructuras militares que le condujeron al estudio de las propiedades de los materiales. A su vuelta a París presentó en la Academia Francesa de las Ciencias el ensayo: *Sur une Application des Regles de maxims et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture* (1773), esencial en la historia de la resistencia de materiales. Allí mostraba los principales resultados relativos a las propiedades de ciertos materiales de construcción, el diseño de muros de contención y de arcos. Más tarde, en 1781 comenzó a realizar investigaciones sobre la torsión, publicando sus resultados en 1784¹³, en donde exponía las leyes de la torsión, determinaba sus posibles aplicaciones, e investigaba las leyes de la coherencia y la elasticidad de cuerpos sometidos a esta carga.

Durante la vida de Coulomb se produjeron cambios importantes en la vida política francesa, que también influyeron en las organizaciones científicas. En 1795 surgía *L'Ecole Polytechnique*, escuela que formaría a dos de los personajes más importantes de la fundamentación teórica

¹³ Coulomb (1784).

de la resistencia de materiales: Navier y Saint-Venant. El primero de ellos recibió, bajo la supervisión de su tío, un famoso ingeniero francés, una sólida formación teórica junto con amplios conocimientos sobre el trabajo real de los ingenieros¹⁴. Trabajó activamente en la construcción de puentes y canales, publicando sus resultados en varios libros. Estos trabajos marcaron un punto de inflexión entre el método ingenieril tradicional y uno más moderno, en el que empleaba un complicado aparato matemático. Desde la perspectiva tradicional, el ingeniero que realizaba diseños debía evitar las fracturas, para lo que debía contar con ciertos factores de seguridad. Simultáneamente, una nueva tradición, la analítica, consideraba las propiedades de los cuerpos desde el punto de vista de la física matemática, es decir, considerándolos como cuerpos flexibles idealizados. Navier, que había sido educado en las dos tradiciones, combinó ambas perspectivas y trató de manera innovadora ciertos problemas hasta ese momento indeterminados en la mecánica de los materiales¹⁵. Estos problemas surgían de tratar los cuerpos como si fueran absolutamente rígidos, pero si se acepta que son elásticos pueden proponerse ecuaciones que dan cuenta de las condiciones de la deformación. Las leyes de la estática no eran suficientes, y por ello era necesario introducir otras que diesen cuenta de las propiedades reales, y no ideales, de los materiales.

El último autor del que se va a tratar en este pequeño repaso histórico sobre los fundadores de la resistencia de materiales es Barré de Saint-Venant, también relacionado con *L'Ecole Polytechnique*. Una de sus principales preocupaciones, manifiesta a lo largo de todos sus trabajos sobre teoría de la elasticidad y teoría de los materiales, fue proporcionar soluciones para aquellos problemas que surgían a los ingenieros en el desarrollo de diseños o de trabajos concretos¹⁶. Sus trabajos sobre la tensión y su relación con la torsión, la flexión, y sobre vibración y deformación plástica constituyen las referencias más importantes en el desarrollo de la teoría de la elasticidad y la resistencia de materiales hasta ese momento.

A partir de Saint-Venant la historia se vuelve difusa y es difícil averiguar el origen de una aportación en la ciencia ingenieril. Este fe-

¹⁴ Timoshenko, S. P. (1953).

¹⁵ McKeon, R. M. (1975).

¹⁶ -It was characteristic of Saint-Venant's work that he never satisfied by giving only a general solution. He always wanted (by calculating tables and preparing diagrams) to present his results in such a form that engineers could use them without difficulty in practical applications- (Timoshenko, S. P. (1953), p. 240).

nómeno, que se ha denominado invisibilidad de los ingenieros¹⁷, ya comenzó a afectar en cierta forma a Saint-Venant, de quien, a pesar del papel fundamental que desempeña en el desarrollo de la resistencia de materiales, apenas si existen referencias sobre su vida y sus trabajos en los diccionarios científicos y en las enciclopedias. El principal motivo de esta indiferencia es la idea dominante de que la tecnología es ciencia aplicada. Es difícil explicar la función de estas personas, que no pueden clasificarse propiamente ni como científicos ni como ingenieros. Reconocer la existencia de una forma diferente de conocimiento desarrollada por ellos supondría aceptar que el modelo tradicional de *tecnología como ciencia aplicada* no es del todo adecuada.

5. ANÁLISIS EPISTEMOLÓGICO DE LA RESISTENCIA DE MATERIALES

Todos los esfuerzos realizados por estos autores sentaron las bases de una teoría típicamente ingenieril que ha conseguido un gran desarrollo experimental y conceptual. A continuación se analizarán aquellas características que le confieren este carácter teórico, similar en muchos casos a los rasgos de cualquier teoría científica, aunque diferentes en otros, que provienen de su conexión más estrecha con los objetivos tecnológicos.

Para analizar esta teoría se ha recurrido a varios manuales utilizados por los propios ingenieros¹⁸. En ellos se define la resistencia de materiales como la ciencia ingenieril que trata sobre la resistencia, la rigidez y la estabilidad de los elementos de las estructuras. Esta ciencia proporciona los métodos de cálculo que determinan las dimensiones necesarias y seguras de las diferentes partes de esas estructuras o piezas de máquinas. Todos los sólidos poseen la propiedad de resistir fuerzas externas (cargas, en términos de la teoría), sin romperse y sin sufrir grandes variaciones en sus dimensiones geométricas. Ello se debe a que poseen las propiedades de resistencia y rigidez. La mecánica teórica trata acerca de las leyes del equilibrio y del movimiento de los cuerpos absolutamente rígidos, es decir, se considera que los cuerpos no cambian a pesar de estar sometidos a ciertas cargas. Pero en reali-

¹⁷ Ver: Goldman, S. L.: (1990) y Tichi, C.: (1987), p. 98.

¹⁸ Se han usado, entre otros: Pisarenko, G. S., Yakovlev, A. P., Matveev, V. V.: (1979); Stepin, P.: (1963); Feodosiev, I.: (1980); Timoshenko, S. P.: (1930); Timoshenko, S. P., Gleason H.: (1935).

dad, todos los cuerpos se deforman bajo la acción de una fuerza. En muchos casos estas deformaciones son pequeñas y sólo pueden detectarse mediante instrumentos de observación especiales; asimismo, no afectan a las leyes generales sobre el equilibrio y el movimiento de los cuerpos, por lo que la mecánica teórica no los tiene en cuenta. Pero sin su estudio es difícil resolver importantes problemas con los que se enfrenta el ingeniero en su trabajo, esto es, conocer bajo qué condiciones puede ocurrir un fallo, así como conocer las condiciones de seguridad de los diferentes materiales y estructuras.

Los conceptos clave de esta ciencia son los de *resistencia*, *rigidez* y *estabilidad*. «La resistencia es la capacidad de una estructura, de sus partes y sus elementos a contrarrestar una carga determinada sin descomponerse. La rigidez es la propiedad de una estructura o de sus elementos de oponerse a las cargas exteriores en lo que se refiere a las deformaciones (cambios de forma y dimensiones). (...) La estabilidad es la capacidad de una estructura o de sus elementos de conservar una forma inicial determinada de equilibrio estático»¹⁹. La resistencia de materiales se encargará de proporcionar los conocimientos suficientes para que los diseños de las estructuras tengan las formas adecuadas y respondan a las exigencias de resistencia, rigidez y estabilidad.

Como cualquier otra teoría comienza por eliminar aquellas propiedades de los fenómenos sobre los que trata que considera irrelevantes. Sin este tipo de simplificaciones no sería posible hallar solución alguna, ya que si intentamos considerar todas las propiedades de una estructura nos daremos cuenta de que son inagotables, y en muchos casos irrelevantes para el resultado final.

Estas simplificaciones se harán sobre: (i) las propiedades de los materiales, (ii) la forma de las estructuras y, (iii) los sistemas de fuerzas aplicados a los elementos de las estructuras:

- i) El primer conjunto de simplificaciones considerará que los materiales son *homogéneos* y *continuos*, independientemente de su propiedades internas. Este supuesto se adopta a pesar de que se sabe que ningún material puede ser realmente homogéneo, debido a su composición molecular, pero esto no se considera relevante dado que el tamaño de las estructuras a estudiar son muy superiores al nivel atómico. Si son homogéneos, serán tam-

¹⁹ Pisarenko, G. S. et al (1979), p. 5.

bién *continuos*, ya que la materia ocupa plenamente el volumen del sólido. Gracias a esta propiedad se puede aplicar el cálculo infinitesimal a los sólidos. Asimismo, los materiales se consideran *isótropos* (las propiedades de cualquier parte del mismo no dependen de la orientación original angular).

- ii) Otra de las simplificaciones se realiza sobre la forma geométrica de los sólidos, que se reduce a cuatro figuras elementales: barras, placas, bóvedas y macizos.
- iii) Por último, en lo que se refiere a las fuerzas, la resistencia de materiales distingue entre fuerzas *exteriores* y fuerzas *interiores*. Las primeras se dividen a su vez en: *fuerzas de volumen*, que están distribuidas en el volumen del sólido y aplicadas a cada partícula del cuerpo; y *fuerzas de superficie*, que sólo están aplicadas sobre determinadas áreas de la superficie. Las fuerzas interiores están determinadas por la interacción de las partes del cuerpo, dentro de unos límites fijados. Para caracterizar la ley de distribución de las fuerzas interiores se introduce el concepto de *tensión*, que será la medida de la intensidad de las fuerzas interiores.

Como ya se ha comentado, la resistencia de materiales se distingue de otras teorías científicas porque considera que los materiales no son absolutamente rígidos, sino que se deforman bajo la acción de determinadas cargas. Así, distingue entre *deformaciones elásticas*, que desaparecen después de haberse anulado la carga, y *deformaciones plásticas*, que no desaparecen. También se propone una clasificación de las diferentes clases de cargas, que serán cuatro en la teoría: tracción (y compresión), torsión, flexión y cizallamiento.

Como se ha podido ver, la resistencia de materiales asume ciertas hipótesis. A continuación se relatan las que pueden considerarse como principales:

- 1) *Hipótesis sobre la continuidad del material*. Se supone que el material llena completamente el volumen que ocupa. En este caso, la teoría atomística de la composición discreta de la materia no se toma en consideración.
- 2) *Hipótesis sobre la homogeneidad e isotropía*. Se supone que las propiedades del material son iguales en todos los puntos y, en

cada punto en todas las direcciones. Esta suposición se hace a pesar de que en algunos casos es inaceptable: por ejemplo, la madera, cuyas propiedades son esencialmente diferentes de través y a lo largo de las fibras, es anisótropa y asimismo lo es el papel.

- 3) *Hipótesis sobre la pequeñez de las deformaciones* (hipótesis de la rigidez relativa del material). Se supone que las deformaciones son pequeñas en comparación con las dimensiones del cuerpo deformado. En algunos casos se ven obligados a renunciar a este principio, lo que se acuerda especialmente.
- 4) *Hipótesis sobre la elasticidad perfecta del material*. Se supone que todos los cuerpos son absolutamente elásticos, aunque se sabe que lo son solamente hasta ciertos valores de las cargas.
- 5) *Hipótesis sobre la dependencia lineal entre las deformaciones y las cargas*. Se supone que para la mayoría de los materiales es válida la ley de Hooke, que establece la dependencia proporcional directa entre las deformaciones y las cargas.
- 6) Como consecuencia de las hipótesis sobre la *pequeñez de las deformaciones y la dependencia lineal entre las deformaciones y los esfuerzos*, durante la solución de la mayoría de los problemas de resistencia de materiales es aplicable el *principio de superposición* (los esfuerzos en cualquier parte de la estructura provocados por diferentes cargas son iguales a la suma de los esfuerzos provocados por cada una de esas cargas y no depende del orden de su aplicación).
- 7) *Principio de Saint-Venant*. Según este principio, las fuerzas internas de los puntos de un cuerpo situados a una distancia suficiente del lugar de aplicación de las cargas, dependen mínimamente de la forma particular en que se aplican esas cargas. Mediante este principio se puede simplificar los cálculos usando la resultante de las fuerzas concentradas en lugar de las fuerzas distribuidas continuamente sobre un área pequeña²⁰.

Una de las hipótesis hace referencia a la ley de Hooke, expuesta por primera vez en 1679 cuando afirmo *ut tensio, sic vis* o lo que es lo mismo *según es la fuerza así será la deformación*. Según la interpreta-

²⁰ Stepin, P.: (1963), p. 15.

ción moderna de la ley de Hooke, la dependencia lineal se establece entre la tensión y la deformación y no entre la fuerza y el desplazamiento. La ley expresa las propiedades del material.

Como podemos ver, la resistencia de materiales y la mecánica teórica son teorías muy diferentes, debido a las hipótesis que se asumen en cada una de ellas. Mientras que la mecánica teórica decide que los materiales no se deforman, es decir, son absolutamente rígidos, la resistencia de materiales asume que se deforman, e incluso que son perfectamente elásticos. Es decir, la propiedad fundamental de los objetos sobre los que trata la resistencia de materiales es su capacidad de deformarse, y por ello ciertas leyes de la mecánica teórica no tienen sentido dentro de la teoría ingenieril. Además de esta hipótesis, que puede considerarse como la principal, se asume otro conjunto de hipótesis relacionadas, como son las de homogeneidad, isotropía y elasticidad perfecta del material, que servirán para el propósito de caracterizar los fenómenos de los que se ocupa la teoría: serán interesantes aquellos materiales que cumplan estas propiedades, e incluso, en algunos casos en los que se sabe que no se cumplen, se puede forzar la definición para ampliar el conjunto de los elementos a estudiar. Así por ejemplo, se sabe que los metales no cumplen la propiedad de isotropía, pero ello sólo si se analizan a nivel micromolecular, a un nivel mayor el comportamiento de estos materiales es el mismo que el de los puramente isótropos, por lo que se decide que los metales también cumplen la propiedad de isotropía.

Una vez que se acepta la hipótesis de que los materiales se deforman surgen ciertos conceptos relacionados. Entre ellos están los de *causa de la deformación*, lo que en esta teoría se denomina *carga*, o el de *tensión interna del material*, o el de las *diferentes formas que pueden adoptar estas cargas*, o los *tipos de deformaciones* que provocan las diferentes cargas. Estos son los conceptos básicos de la resistencia de materiales y a partir de ellos y mediante la aplicación de métodos experimentales y matemáticos se construye su corpus teórico característico.

Puesto que las propiedades de las que tratan son distintas, la resistencia de materiales no puede ser la aplicación de la teoría física. Comparten ciertos teoremas, pero ello no convierte a la teoría ingenieril en una aplicación de la teoría física.

Al mismo tiempo, toda teoría de las ciencias ingenieriles está determinada por un principio fundamental: la necesidad de buscar conocimientos útiles y eficientes en la resolución de problemas prácticos. Este principio fundamental adoptará diferentes formas en cada caso particular. Así, en la resistencia de materiales el objetivo principal es proporcionar esquemas de cálculo que permitan determinar cuál es la forma más segura, económica y eficiente de las estructuras. Además de este *desideratum* puede existir otro conjunto de valores como, por ejemplo, en el caso de un puente o de una cubierta de un edificio puede ser necesario incluir el objetivo de ser estéticamente agradable. El conjunto de los valores que subyacen a las teorías de las ciencias ingenieriles las distinguen de las teorías científicas.

Las propiedades de los objetos que resultan interesantes desde el punto de vista de las ciencias ingenieriles, así como su metodología están determinadas por los objetivos propios de estas ciencias. La hipótesis asumidas y los objetivos que subyacen a esas ciencias las distinguen de otras, como las ciencias naturales y formales que buscan el conocimiento más verdadero y las soluciones más exactas, mientras que aquellas persiguen conocimientos útiles para la construcción eficiente y segura de los artefactos tecnológicos.

6. LAS CIENCIAS INGENIERILES

Una vez que se ha analizado una teoría tecnológica, la resistencia de materiales, estamos en mejor disposición de proponer una serie de características que confirmen y amplíen las propuestas anteriores. Así, podemos definir las diferentes ciencias ingenieriles como conjuntos de teorías que pretenden proporcionar conocimientos de carácter *representacional* y *explícito*²¹ acerca de ciertos aspectos de la realidad, y sobre ciertas características de los fenómenos naturales y artificiales. Para la formulación de estas teorías se emplean métodos experimentales, se utilizan herramientas matemáticas y se recurre, cuando es necesario, a los conocimientos teóricos desarrollados por otras ciencias afines (no necesariamente naturales, formales o sociales). La característi-

²¹ M. A. Quintanilla distingue entre cuatro clases de conocimiento: representacional, operacional, explícito y tácito. De la combinación de éstas se obtienen cuatro formas complejas: *saber qué* (explícito y representacional), *saber cómo* (explícito y operacional), *intuición* (representacional y tácito) y, *habilidad* (operacional y tácito).

ca que las distingue de otro tipo de ciencias es que, además de un sub-objetivo cognoscitivo, la función descriptiva, básica en todo conocimiento científico, tienen un objetivo general práctico: proporcionar conocimientos bien fundamentados que posteriormente puedan ser utilizados por los diseñadores. Este objetivo práctico condiciona la naturaleza de los elementos de las teorías, como la utilización de un aparato matemático en ocasiones menos sofisticado que en otras ciencias, el empleo de abstracciones, que escogerán aquellos aspectos de la realidad relacionados con la fabricación de artefactos, y la inclusión de factores de corrección junto con las leyes propuestas, con el objetivo de respetar las medidas de seguridad y que las leyes no fallen en condiciones naturales.

Las investigaciones se pueden originar de dos maneras diferentes: a partir de problemas surgidos durante la fase de diseño, o a partir de las propias investigaciones llevadas a cabo en el seno de una teoría ya en marcha. Una vez que se ha determinado el problema que se pretende resolver, se seleccionan aquellos aspectos de la realidad relevantes y se identifican las propiedades sobre las que va a tratar la teoría, para lo que se recurre, como en el resto de las ciencias, a ciertas abstracciones y simplificaciones sobre las propiedades del objeto de estudio. Mediante este procedimiento se acotarán los fenómenos sobre los que trabaja la teoría. Estas simplificaciones y abstracciones realizadas por las ciencias ingenieriles pueden resultar, desde el punto de vista de otras ciencias, inaceptables. Ello se debe a que el objetivo general de las ciencias ingenieriles (la obtención de conocimientos útiles) puede obligarles a no tener en cuenta la corrección de esos conocimientos desde la perspectiva de ciencias cuyo conocimiento se encuentra supuestamente mejor fundamentado. Esos conocimientos más correctos pueden elevar la complejidad del fenómeno de tal manera que no se pueda obtener a partir de ellos una respuesta útil. De esta forma, el objetivo práctico de las ciencias ingenieriles determina la estructura de las teorías particulares.

En las ciencias naturales y sociales se realizan abstracciones generales de los elementos de la realidad sobre los que se quiere tratar, de forma que puedan dar cuenta de un gran número de fenómenos. En el caso de las ciencias ingenieriles, las abstracciones son menos generales y dan cuenta de menos fenómenos, ya que la caracterización de los mismos debe ser más pormenorizada, aunque la capacidad explicativa se vea sí reducida.

Una vez que se posea cierto conocimiento contrastado acerca del comportamiento de los fenómenos estudiados, así como de sus propiedades, se podrán enunciar leyes que tendrán funciones predictivas y descriptivas. La diferencia que existe entre las leyes enunciadas en el seno de las ciencias ingenieriles y las de las ciencias naturales es que las primeras suelen acompañar sus leyes con factores de corrección que permiten modificarlas en el caso de que no sean lo suficientemente precisas. Además, las teorías suelen acompañarse de un conjunto bastante amplio de casos particulares, concreciones de las teorías y de las leyes que facilitan el trabajo a los diseñadores. Un elemento de corrección muy empleado es el llamado *coeficiente de seguridad*: en el caso de que no se conozca con exactitud el comportamiento real de los fenómenos, y sólo tengamos un conocimiento aproximado, pueden acotarse unos valores máximos y mínimos seguros, entre los cuales se sabe que los fenómenos exhibirán un comportamiento adecuado a las necesidades establecidas. Otra posibilidad que permite acercar las leyes a los casos concretos y así poder aplicarlas es generarlas mediante una descripción de los datos experimentales con los que se cuenta, que intente ser completa y simple, utilizando lo menos posible las simplificaciones. El problema de esta solución es que el conocimiento así obtenido no tiene un carácter general y está más pegado a los casos particulares que pretende explicar. Aplicando estas soluciones, las leyes de las teorías de las ciencias ingenieriles salvan la distancia que existe entre una formulación abstracta y simplificada de los fenómenos y los hechos reales con los que se enfrentan los ingenieros cuando tienen que diseñar cierto artefacto. Los problemas con los que se enfrentan las leyes de otras ciencias en torno a las simplificaciones y las abstracciones no tienen cabida dentro de las ciencias ingenieriles, más próximas a la realidad por el objetivo práctico que persiguen.

Estas investigaciones pueden llevarse a cabo en dos ámbitos diferentes: las universidades y los laboratorios de I+D de las empresas. Las investigaciones que se realizan en las empresas suelen estar más relacionadas con la solución de problemas concretos que han surgido en las fases de diseño. Sus resultados tienen un gran impacto en los nuevos artefactos que se fabrican. Las investigaciones realizadas en las universidades tienen un carácter más general y pueden ser de utilidad para resolver múltiples problemas.

Las ciencias ingenieriles mantienen relaciones entre sí, así como con otras ciencias formales, naturales y sociales. Los conocimientos obteni-

dos por las ciencias naturales, formales y sociales pueden sugerir nuevas líneas de investigación para las ciencias ingenieriles. Pero éstas también pueden ser una influencia para las otras ciencias, impulsando nuevas investigaciones y desarrollos. Reducir estas relaciones a una sola, la de subordinación de la tecnología con respecto a la ciencia mediante el proceso de aplicación, supone una visión sesgada de lo que puede suceder. Es cierto que las ciencias ingenieriles pueden emplear ciertos conocimientos desarrollados por otras ciencias, pero éstos no son suficientes para los propósitos tecnológicos. Además, para que esos conocimientos sean útiles desde el punto de vista de la tecnología, es preciso que se produzca cierto proceso de traducción o transformación (S. L. Goldman²²). La diferencia de objetivos que existe entre unas ciencias y otras induce a transformar los conocimientos si se quiere hacer uso de ellos en una teoría que no es la propia. De la misma manera que se producen esas transformaciones entre la matemática y la física o entre la física y la química, otro tanto sucede cuando se hace uso de los conocimientos de las ciencias formales, naturales y sociales en las ciencias ingenieriles. Y esta transformación no es una mera aplicación. Los tecnólogos que están en disposición de utilizar conocimientos provenientes de otras ciencias deben poseer una formación más general que la que reciben la mayor parte de los ingenieros. Esta formación les proveerá de herramientas conceptuales para acceder a cualquier clase de teoría, a partir de las que podrán extraer conocimientos relevantes para el desarrollo de sus teorías tecnológicas. Pero también las diversas ciencias naturales, formales o sociales pueden utilizar conocimientos de las ciencias ingenieriles. Este es el caso, por ejemplo, del uso que de la resistencia de materiales se hizo en la teoría física del éter y en la teoría la matemática de la elasticidad.

7. CONCLUSIONES

Varias aproximaciones epistemológicas al fenómeno tecnológico reconocen la existencia de cierto conocimiento teórico desarrollado por la propia tecnología que no proviene de la aplicación de teorías científicas. Se le ha denominado de diversas formas, pero todos los autores coinciden en señalar unas cuantas características que lo diferencian de las ciencias clásicas. El rasgo que parece condicionar estas diferen-

²² Goldman, S. L. (1990).

cias es un objetivo general práctico: que ese conocimiento sea útil para la solución de problemas que surgen en el desarrollo de nuevos diseños. Por ello, las teorías ingenieriles deben estar acompañadas de factores de corrección, valores máximos y mínimos de seguridad o ejemplos de implementación de la teoría, que faciliten su utilización en el diseño. No son necesariamente teorías más simples, lo que sucede es que no requieren de complicados desarrollos que puedan impedir su utilización práctica. La elección del objeto de estudio, las simplificaciones e hipótesis que se asumen dependen, asimismo, de este objetivo. Por el contrario, las ciencias básicas tienen como objetivo principal la búsqueda del mejor conocimiento posible, lo que conlleva una formulación excesivamente compleja y abstracta desde el punto de vista ingenieril. De este modo, se comprende porqué la aplicación directa de teorías de las ciencias básicas no es apta para su utilización tecnológica, así como porqué el concepto de *ciencia aplicada*, que da a entender un proceso de trasvase de conocimiento entre la ciencia y la tecnología, no es adecuado para caracterizar estas ciencias ingenieriles. Por todo ello creemos que resulta más adecuado tratarlas como *ciencias para la aplicación*, dado que así se hace referencia tanto al carácter científico como al objetivo práctico de las teorías tecnológicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Agassi, J.: «Between Science and Technology», *Philosophy of Science*, **47**, (1980), 82-99.
- Bush, V.: *Science, The Endless Frontier: A Report to the President*, Washington, D.C. 1945.
- Bunge, M.: «Technology as Applied Science», *Technology and Culture*, **3**, (1966), 329-347.
- Bunge, M.: *La investigación científica: Su estrategia y su filosofía*, Buenos Aires, S. XXI, 1969.
- Coulomb (1784): *Reserches theoriques tet experimentaless sur a force de torsion et sur l'elasticite del metal*.
- Cuevas A.: *Caracterización de conocimiento tecnológico y su desarrollo: Hacia una epistemología de las ciencias ingenieriles*. Tesis doctoral, San Sebastián, 2000.
- Durbin, P. T. (Ed.): *Broad and Narrow Interpretation of Philosophy and Technology*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990.
- Faulkner, W., Senker, J, & Velho, L.: *Knowledge Frontiers: Industrial Innovation and Public Sector Research in Biotechnology, Engineering Ceramics and Parallel Computing*, Oxford, Clarendon Press., 1994.

- Feodosiev, I.: *Resistencia de materiales*, Moscú, Mir, 1980.
- Galileo Galilei: *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno à due nouue scienze. Attenenti alla Mecanica & i Movimenti Locali*, 1638.
- Gibbons, M. & Johnston, R.: «The Role of Science in Technological Innovation», *Research Policy*, **3**, (1974), 220-242.
- Goldman, S. L.: «Philosophy, Engineering, and Western Culture», en Durbin, P. T. (Ed.): *Broad and Narrow Interpretation of Philosophy and Technology*, Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1990, pp. 125-152.
- Kline, R.: «Constructing «Technology» as «Applied Science» Public Rhetoric of Scientist and Engineers in the United States», *Isis*, **86**, (1995), 194-221.
- Layton, E.: «American Ideologies of Science and Engineering», *Technology and Culture*, **17**, (1976), 688-701.
- McKeon, R. M.: «Navier» en Ch. C. Gillispie (Ed.): *Dictionary of Scientific Biography*, Vol. X, Charles Scribner's Sons, New York, 1975, pp. 2-5.
- Niiniluoto, I.: «Approximation in Applied Science» en M. Kuokkanen (Ed.) (1995): *Structuralism, Approximation, and Idealization*, Poznan Studies in the Philosophy of the Sciences and the Humanities, **Vol. 42**, p.p. 127-139.
- Pisarenko, G. S., Yakovlev, A. P., Matveev, V. V.: *Manual de resistencia de materiales*, Moscú, Mir, 1979.
- Rapp, F.: *Analytical Philosophy of Technology*, Boston Studies in Philosophy of Science, vol. 63, Dordrecht, Reidel, 1981.
- Rapp, F. (Ed.): *Contributions to a Philosophy of Technology. Studies in the Structure of Thinking in the Technological Sciences*, Dordrecht, Reidel, 1974.
- Rosenberg, N. & Nelson, R. R.: «American Universities and Technical Advance in Industry», *Research Policy*, **23**, (1994), 323-348.
- Rothwell, R.: «The characteristics of Successful Innovators and Technical Progressive Firms», *Research & Management*, **7**, (1977), 191-206.
- Stepin, P.: *Strength of Materials*, Gordon and Breach, New York, 1963.
- Tichi, C.: *Shifting Gears: Technology, Literature, Culture in Modernist America*. Chapel Hill, Univ. North Carolina Press, 1987.
- Timoshenko, S. P.: *Strength of materials*, New York, D. Van Nostrand Company, Inc., 1930.
- Timoshenko S. P. & Gleason H.: *Elements of strength of materials*, MacCullough. New York, D. Van Nostrand company, Inc., 1935.
- Timoshenko, S. P. : *History of Strength of Materials*, New York, McGraw-Hill, 1953.
- Tondl, I.: «On the Concepts of «Technology» and «Technological Sciences» en Rapp, F. (Ed.): *Contributions to a Philosophy of Technology. Studies in the Structure of Thinking in the Technological Sciences*, Dordrecht, Reidel, 1974. 1-18.