

FILOSOFÍA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL UNA APROXIMACIÓN

Alberto BENÍTEZ REYNOSO
Ingeniero Civil, M.Sc., Ph.D.
Tarija, Bolivia

Breve referencia de la trayectoria profesional

- Ingeniero Civil, Master en Teoría y Aplicación Práctica del Método de los Elementos Finitos y Simulación, Magíster en Ingeniería Vial y Doctor (Ph.D.) en Ingeniería.
- Más de 20 años de experiencia como docente universitario (grado y posgrado) y consultor.
- Decano de la Facultad de Ciencias y Tecnología (1992-1994) y Vicerrector (1994-1997) de la Universidad Autónoma J.M. Saracho de Tarija (Bolivia).

RESÚMEN

Son pocos los filósofos que reflexionan sobre los fundamentos científicos de la ingeniería estructural, así como son escasos los ingenieros que filosofan sobre su epistemología.

En ese marco, se plantea el **problema** mediante las siguientes preguntas:

¿Cómo caracterizar a la ingeniería estructural, en el contexto científico y tecnológico?. ¿Es la ingeniería estructural solamente una ciencia aplicada?.

El **objetivo** principal es: Caracterizar a la ingeniería estructural en el contexto científico y tecnológico y crear las bases para una “filosofía de la ingeniería estructural”.

La **estrategia metodológica**, fundamentalmente racional, consiste en:

- Breve revisión histórica de los principales hechos científicos que marcaron hitos importantes.
- Revisión de los conceptos epistemológicos más importantes y su asociación con la ingeniería estructural.
- Precisión de los fundamentos científicos de la ingeniería estructural.
- Definición de los “momentos” propios del objeto de estudio de la ingeniería estructural, desde su concepción mental, hasta su materialización.
- Adopción una postura fundamentada respecto de la definición de la ingeniería estructural.

Los **resultados** son:

- Caracterización y definición de la ingeniería estructural en el contexto científico.
- Establecimiento de las bases para la construcción de una filosofía de la ingeniería estructural.

Como **conclusiones** se tienen:

- La ingeniería estructural puede caracterizarse como ciencia aplicada, pero, es mucho más que eso. Es también una tecnología.
- La ingeniería estructural, con sus particularidades, usa el método científico. Por ello, la ingeniería estructural puede ser incluida en la categoría científica.

PHILOSOPHY OF STRUCTURAL ENGINEERING AN APPROXIMATION

ABSTRACT

Few philosophers think over scientific basis of structural engineering. Also, are few the engineers that philosophize on its epistemology.

*The **problem** is: How to characterize the structural engineering in the scientific and technological context?, Is the structural engineering only a applied science?.*

*The **objective** can be expressed as follows: To characterize the structural engineering in the scientific and technological context, reflect on the subject and create the basis for a “philosophy of structural engineering”.*

*The **methodology** (mainly rational) is as follows:*

- A brief review of the main historical scientific principles of the structural engineering and related disciplines.*
- A review of the main epistemology concepts and its association with the structural engineering.*
- Stating the scientific principles and laws of the structural engineering.*
- Definition of the “moments” of the structural engineering study object, the structure, from the initial idea to the construction as physical object.*
- Adoption of an argued position respect to a definition of structural engineering.*

*The **results** are:*

- Characterization and definition of structural engineering in the scientific and technological context.*
- Creating the bases for a philosophy of structural engineering.*

*The **conclusions** are:*

- The structural engineering can be characterized as an applied science. But it is much more than this. It is also a technology and more.*
- The structural engineering, with its own particularities, uses the scientific method. So, the structural engineering can be included in the scientific category.*

INTRODUCCIÓN

La Ingeniería Civil es, sin lugar a dudas, la más antigua, la más universal, la más clásica y la más relacionada con la sociedad de todas las ramas de la Ingeniería¹. La ingeniería estructural, rama importante de la primera, en consecuencia, tiene las mismas características.

Pese a las citadas particularidades, son muy pocos los estudios, análisis y discusiones sobre los aspectos filosóficos más relevantes de la ingeniería civil en general y la ingeniería estructural en particular. Por ejemplo, en la mayoría de las Universidades nacionales no existen escenarios que permitan este tipo de reflexiones, el tema no se plantea a nivel curricular y tampoco se estudia a nivel de posgrado, excepto en muy pocas Facultades de filosofía, en el campo de la filosofía de la ciencia. En suma, no se plantean respuestas a preguntas como las siguientes:

¿Es la ingeniería civil (estructural) una ciencia?

Si la respuesta es afirmativa, ¿Qué tipo de ciencia es?

¿Cuáles son sus leyes más generales?

En consecuencia, se persiguen los siguientes objetivos:

1. Contribuir a la permanente reflexión y análisis filosóficos sobre una de las ramas de la ingeniería: la ingeniería civil y en particular la ingeniería estructural.
2. Precisar los aspectos conceptuales y leyes más generales que están invariablemente presentes en la ingeniería estructural.
3. Esquematizar una respuesta una de las pregunta planteadas anteriormente:
¿Cuáles son las leyes más generales de la ingeniería estructural?

Para dar respuestas a las preguntas citadas en los párrafos que preceden parece apropiado recurrir a los siguientes elementos:

- La historia de la ingeniería civil-estructural, aunque sea sintéticamente, porque es una referencia fundamental en el desarrollo de la misma.
- Los conceptos fundamentales clásicos referidos al léxico usando en la ciencia.
- El fundamento científico de la ingeniería estructural, que es lo que nos permitirá posicionar a esta rama de la ingeniería en el contexto de la ciencia.
- Las actividades propias del ingeniero estructural en el ejercicio práctico de la profesión y los métodos que usa, lo que, juntamente a los elementos anteriores contribuyen a precisar una definición de la ingeniería estructural.

UNA BREVE MIRADA HISTÓRICA

La ingeniería civil-estructural aparece juntamente con la humanidad. Se puede afirmar que el ser humano siempre trató de protegerse de los fenómenos naturales que atentaban contra su seguridad. He ahí el nacimiento de la ingeniería civil, cuyo desarrollo ha ido evolucionando paralelamente al de la sociedad.

Además de los conocimientos aportados por pueblos antiguos, la ingeniería civil ha hecho uso de otros derivados de estudios de eminentes científicos. En el cuadro 1, que sigue, se presenta un resumen de parte de la evolución de la ingeniería civil en su pasado reciente.

La síntesis histórica presentada en el cuadro mencionado se complementa, de manera fundamental, con el hecho de que, a partir del siglo XVIII, la resistencia de los materiales, ciencia imprescindible de la ingeniería estructural, tiende a fundamentar sus principios y leyes sobre la base de ensayos de laboratorio, para lo cual se comienzan a construir diferentes y especiales equipos y aparatos².

CUADRO 1

RESUMEN HISTÓRICO DE LA INGENIERÍA CIVIL

AÑOS	PRINCIPALES APORTES	AUTOR
1635-1703	Ley de Hooke	Robert Hooke
1642-1727	Leyes del movimiento, cálculo diferencial e integral.	Isaac Newton
1654-1705	Principio de la deformación transversal de una viga.	James Bernoulli
1667-1748	Conceptos hidráulicos y mecánica de los materiales.	Johan Bernoulli
1700-1782	Ecuación de Bernoulli (hidráulica) y estructuras.	Daniel Bernoulli
1707-1783	Mecánica estructural	Leonhard Euler
1736-1806	Aportes a la física y la mecánica de los materiales.	Agustín Coulomb
1785-1836	Investigaciones en la mecánica estructural	Louis Marie Henri Navier
1797-1887	Flujo no permanente en canales abiertos y aportes a la teoría de la elasticidad.	Barre de Saint Venant
1820-1872	Aportes a la Mecánica de suelos y la mecánica estructural.	William Rankine
1830-1879	Problemas hiperestáticos.	James Clerk Maxell
1835-1918	Esfuerzos combinados.	Otto Mohr
1847-1884	Teoría del trabajo virtual.	Alberto Castigliano
1883-1963	Aportes a la mecánica de suelos, padre de esta rama.	Karl Terzaghi

(Adaptado y complementado en base a la referencia 2)

REVISIÓN DE CONCEPTOS FUNDAMENTALES DEL LÉXICO CIENTÍFICO

Los conceptos que siguen, basados en la literatura especializada^{3, 4 y 5}, y, las características propias de la ingeniería estructural, permitirán posicionar a esta rama de la ingeniería civil en el contexto de la filosofía de la ciencia.

Ciencia

El concepto de ciencia ha sido ampliamente debatido durante muchos años por filósofos de la ciencia y científicos de todo el planeta. De ahí que se tienen varias definiciones, tres de las cuales, se presentan a continuación.

La ciencia es un estilo de pensamiento y de acción: precisamente el más reciente, el más universal y el más provechoso de todos los estilos.

La ciencia es un sistema de conocimientos referentes a un ámbito de objetos claramente delimitados, dispuestos en un orden lógico, que generalmente procede de lo más evidente y universal, hasta lo más concreto y particular.

La Ciencia es un paradigma (modelo) fundamentado.

Investigación

En la ciencia hay que distinguir entre el trabajo (investigación) y su producto final, el conocimiento científico.

Es decir, la investigación es el proceso mediante el cual se genera o produce conocimiento científico. Para ello la ciencia utiliza el método científico.

Método científico

Es el procedimiento adecuado para lograr, mediante el trabajo (investigación científica) su producto final, el conocimiento científico.

Aquellas disciplinas que generan conocimiento científico a través del proceso de la investigación científica, usando el método científico, se llaman ciencias.

Ciencia básica, ciencia aplicada y tecnología

Los métodos son medios para alcanzar ciertos objetivos. Si el objetivo de la ciencia es puramente cognitivo, es decir, si solo se persigue incrementar el conocimiento, se está en presencia de una ciencia pura.

La ciencia aplicada, en cambio, utiliza el mismo método general de la ciencia básica y varios métodos especiales de ella y puede definirse como el conjunto de aplicaciones de la ciencia básica o pura.

Es decir, la diferencia entre ciencia básica o pura y ciencia aplicada se puede precisar en base a los objetivos de cada una de ellas.

Un ejemplo puede ayudar a comprender la diferencia.

Quienes estudian la flora de un país hacen botánica, y quienes estudian recursos vegetales hacen botánica aplicada: buscan y estudian plantas, árboles u hongos de posible utilidad en la alimentación, la medicina o la industria.

En cuanto a la diferencia entre ciencia (básica o aplicada) y tecnología, se resume en esto: mientras la primera se propone descubrir leyes para comprender la realidad íntegra, la segunda se propone controlar ciertos sectores escogidos de la realidad con ayuda de conocimientos de todo tipo, en particular científicos. Tanto una como

otra parten de problemas, pero los problemas científicos son puramente cognoscitivos, en tanto que los problemas tecnológicos son prácticos. Ambas buscan datos, formulan hipótesis y teorías y procuran poner a prueba estas ideas por medio de observaciones, mediciones, experimentos o ensayos (método científico). Pero muchos de los datos, hipótesis y teorías empleados en la tecnología son tomados de la ciencia y, en todo caso, se refieren a sistemas controlables, tales como carreteras, puentes, edificios, ríos o bosques. La investigación científica se contenta con conocer; la tecnología emplea parte del conocimiento científico y agrega conocimiento nuevo para diseñar y planear cursos de acción que tengan algún valor práctico para la sociedad o un grupo social. En suma, la tecnología se asocia a la producción de bienes y servicios.

Hay otras maneras de clasificar a las ciencias, por ejemplo, en ciencias formales como las matemáticas y la lógica y ciencias fácticas como las ciencias naturales, clasificación que consideras el tipo de objeto de conocimiento.

FUNDAMENTO CIENTÍFICO O LEYES DE LA INGENIERIA ESTRUCTURAL

La mecánica en el contexto científico

En ámbito científico, se entiende que una hipótesis científica que se ha comprobado, por procedimientos también científicos, se convierte en una ley científica. Esta ley científica se puede definir como una relación constante entre dos o más hechos, fenómenos o variables. Asimismo, un conjunto de leyes científicas, unificadas, ordenadas e interrelacionadas, constituye una teoría⁶.

La mecánica es una teoría científica que estudia el movimiento de los cuerpos y sus causas, o bien el equilibrio, es decir, la falta de movimiento, como un caso particular de movimiento. Se trata de una teoría científica porque, en primer lugar es congruente con la definición de teoría establecida anteriormente y, en segundo término, porque interpreta la realidad observada que, en este caso, son los fenómenos naturales que se observan experimentalmente. Para ello, la mecánica parte de unos principios fundamentales, sobre los que se basa una teoría mediante modelos matemáticos, dando así una interpretación y explicación coherente a las observaciones de tipo experimental⁷.

En la actualidad, hay tres teorías principales de la mecánica⁷, a saber:

- La mecánica clásica, cuyo desarrollo moderno se considera que se inicia con los “Principios Matemáticos de la Filosofía Natural” de Newton, continuando con otros destacados científicos como los Bernoulli, Euler, D’Alembert, Lagrange, Hamilton y otros.
- La mecánica relativista, que suple la inexactitud de la mecánica clásica para velocidades cercanas a la velocidad de la luz (teoría de la relatividad restringida) o para campos gravitatorios muy intensos (teoría de la relatividad generalizada). La propuso Albert Einstein e implica un rigor matemático mayor.
- La mecánica cuántica, que surge de las observaciones de las partículas elementales, en las que intervienen acciones (productos de energía por tiempo) tan pequeñas que son comparables a la constante de Planck. En este caso se aplica el principio de incertidumbre o indeterminación de Heisenberg, que establece la imposibilidad de medir de manera precisa la posición y la velocidad de la partícula al mismo tiempo, variables cuyos valores se pueden conocer sólo

de manera probabilista. Se debe a Broglie, Schrodinger y Dirac, como los científicos más relevantes.

La mecánica clásica, conocida también como mecánica analítica, dinámica o simplemente mecánica, constituye una teoría coherente, capaz de proporcionar interpretaciones y predicciones suficientemente precisas para la mayoría de los fenómenos que observamos, concretamente para el movimiento de los cuerpos materiales y el equilibrio de éstos como caso particular.

Vale la pena destacar que la mecánica no es una teoría agotada en su desarrollo, es decir, las nuevas y permanentes investigaciones podrían provocar nuevas interpretaciones de los fenómenos. En este ámbito, se tiene la mecánica de los medios continuos como parte de la mecánica clásica, que estudia el movimiento y deformación de los medios continuos como los sólidos y los fluidos. Así, se tienen, la mecánica de los materiales o resistencia de materiales, la mecánica de los fluidos y la mecánica de los suelos, las tres de capital importancia en la ingeniería civil.

Indudablemente, la base de la mecánica, como teoría científica, está constituida por las leyes de Newton, formuladas en su obra denominada Principios Matemáticos de la Filosofía Natural, ya referida anteriormente. Estas leyes, tal como se las formula en la actualidad, son:

- Primera Ley: Un cuerpo siempre está en reposo o en movimiento uniforme, a menos que haya una causa (fuerza) capaz de modificar dichos estados.
- Segunda Ley: Si sobre un cuerpo actúa una fuerza diferente de cero, el mismo adquiere una aceleración proporcional a la magnitud de la fuerza y en su misma dirección.
- A toda acción (fuerza) se opone una reacción (fuerza) de la misma magnitud, dirección y sentido contrario.

Habiendo revisado, brevemente, las características de la mecánica como teoría científica y sus principios fundamentales, las leyes de Newton, veamos el papel que juegan en la ingeniería estructural. Para ello vamos a caracterizar brevemente dos disciplinas científicas de uso generalizado en esta rama de la ingeniería civil. Nos referimos a la Estática y la Resistencia de los Materiales, de las cuales la ingeniería estructural, definitivamente, no puede prescindir.

La estática

La estática, como su nombre lo indica, estudia el equilibrio o reposo de los cuerpos, tanto concebidos como partículas como considerados como sólidos rígidos. En el primer caso, no se consideran las dimensiones del cuerpo, en tanto que, en el segundo, las dimensiones toman importancia.

Para que una partícula se encuentre en equilibrio, la suma de las fuerzas que actúan sobre ella debe ser igual a cero. En tanto que, para que un cuerpo rígido esté en equilibrio, adicionalmente, la suma de los momentos de las fuerzas que actúan sobre el mismo debe ser igual a cero. Estas se conocen como condiciones de equilibrio de un cuerpo rígido o leyes de la estática.

Es claro que estas leyes de la estática no son nada más ni nada menos que un caso particular de la segunda ley de Newton.

Por otra parte, vale la pena aclarar que las leyes de la estática así expresadas son válidas en la medida en que el cuerpo se suponga rígido, es decir, indeformable. Así aplicadas permiten resolver varios tipos de problemas de la ingeniería estructural.

Precisamente, las estructuras para cuya solución son suficientes las leyes de la estática mencionadas, reciben el nombre de estáticamente determinadas o isostáticas, en tanto que, las estructuras estáticamente indeterminadas o hiperestáticas son las que, para su solución, ya no son suficientes las leyes de la estática tal como las concibe la mecánica teórica.

La resistencia de los materiales

La resistencia de los materiales es una rama de la mecánica que estudia las relaciones entre las cargas externas (fuerzas) aplicadas a un cuerpo deformable (estructura) y la intensidad de las fuerzas internas que actúan dentro del cuerpo. Esta disciplina de estudio implica también calcular las deformaciones del cuerpo y proveer un estudio de la estabilidad del mismo cuando está sometido a fuerzas externas⁸.

La resistencia de los materiales, contrariamente a lo que establece la mecánica teórica (cuerpo o sólido rígido), considera que el cuerpo o sólido no es rígido, sino deformable.

Además, la resistencia de los materiales adopta otras hipótesis propias que la hacen aplicable a la solución de problemas prácticos de la ingeniería de estructuras. Entre estas hipótesis se tienen: la homogeneidad e isotropía del material, su comportamiento elástico (ley de Hooke), el tamaño de las deformaciones (adoptadas como pequeñas) y otras. Evidentemente, estas hipótesis hacen que la resistencia de los materiales se convierta en una ciencia útil para los fines prácticos y contribuya de manera fundamental a resolver problemas de interés colectivo.

Debido a las hipótesis que adopta la resistencia de los materiales, se establece que la resistencia de los materiales y la mecánica teórica obedecen a teorías muy diferentes y que ciertas leyes de la mecánica teórica no tienen sentido dentro de la teoría de las ciencias de la ingeniería⁹. Mientras, como se dijo, la mecánica teórica asume que los materiales son rígidos, es decir, no se deforman, la resistencia de los materiales se basa en la particularidad de los materiales de deformarse.

Nosotros preferimos ser menos severos con la mecánica teórica y afirmar que sus leyes si bien no son suficientes en la resistencia de los materiales, son absolutamente necesarias, es decir, tienen sentido y siguen siendo válidas en el ámbito de la mecánica de los materiales en particular y la ingeniería de estructuras en general. Otra cosa es que ya no sean suficientes y por ello, adicionalmente, se hacen hipótesis que conducen a la solución de problemas prácticos.

En suma, las leyes de la mecánica, juntamente con las leyes propias de las ciencias de la ingeniería como la resistencia de materiales, teoría de la elasticidad y otras, constituyen el fundamento científico de la ingeniería estructural. Es claro que este fundamento científico se origina en los principios fundamentales de la mecánica clásica como son las tres leyes de Newton. Por ello, varias universidades del mundo han creado un área especializada conocida como **mecánica estructural**, la cual se refiere a las aplicaciones de la mecánica al análisis, diseño y construcción de estructuras, es decir, se constituye en una ciencia aplicada fundamental para el ingeniero de estructuras.

Consecuentemente, es claro que, dadas las particularidades de la estática y la resistencia de los materiales, su aplicación a otras disciplinas y teorías ingenieriles es incuestionable y han permitido, entre otras, el nacimiento de la teoría del hormigón armado y pretensado, las estructuras metálicas, de madera, etc.

Finalmente, cuando se tipifican las cargas o fuerzas que actúan en las estructuras, se hace referencia, de manera general, a cargas estáticas y cargas dinámicas. Dentro de estas últimas se tienen los sismos, el viento, las cargas por impacto, las vibraciones producidas por equipos, etc. Si se tienen que analizar y diseñar este tipo de estructuras, evidentemente la segunda ley de Newton permite, con la ayuda de otros elementos, determinar las acciones y por lo tanto el diseño de las mismas. Es más, nace una nueva disciplina científica, conocida como dinámica estructural, cuyo fundamento, una vez, más es la mecánica teórica.

LAS ACTIVIDADES Y MÉTODOS DEL INGENIERO DE ESTRUCTURAS

¿Qué hace el ingeniero estructural en el ejercicio de la profesión y qué métodos utiliza?

Sin duda alguna, esta es una pregunta clave para ayudar a posicionar a esta rama de la ingeniería en ámbito de la ciencia.

Algunos filósofos e ingenieros intentan caracterizar a la ingeniería considerando las tareas principales del ingeniero en el ejercicio de la profesión.

Así, Aleksnader, I., en *Philosophy of Engineering*¹⁰, trata de responder a la pregunta ¿Qué es la ingeniería?, de la siguiente manera:

- Creación de algo útil, usando matemáticas y ciencia. Esta es una definición de un diccionario americano;
- Transformación de las ideas en realidad;
- Aplicación práctica de la ciencia al comercio y la industria;
- Transformación de las propiedades de la materia de modo que sea útil en estructuras y máquinas;

Por su parte, Aracil¹¹, hace referencia a la definición tradicional de la ingeniería como la “aplicación de los conocimientos científicos a la técnica industrial, a la construcción de obras públicas y a las necesidades de guerra”. El mismo autor afirma que esta definición, aparte de ser incompleta con relación al dominio que abarca, lleva una especie de subordinación de la ingeniería a la ciencia, por eso, en su opinión, esta definición es relativa y cuestionable. Consecuentemente, el referido autor concluye estableciendo que la ingeniería surge de una ponderada combinación de creación y cálculo, de una particular interacción entre conocimiento científico y acción. En esta creación es determinante el genio y el ingenio libremente desplegados, mientras que en el cálculo lo es el conocimiento científico acumulado y el uso de los rigores de la razón. De ahí es que, la conjunción entre conocimiento, creatividad, ingenio y racionalidad conducen a las ciencias de la ingeniería y, en consecuencia a la tecnología asociada a la producción de bienes y servicios.

Asimismo, se puede afirmar que lo fundamental en el científico es *conocer*; lo importante en el ingeniero es *hacer*¹². En otros términos, el científico tiene objetivos de tipo cognitivo, es decir, conocer por conocer, en tanto que el ingeniero tiene objetivos de interés práctico, de interés social, lo que significa conocer para hacer. Claro que el conocimiento científico es uno de los muchos medios que dispone el ingeniero para alcanzar sus objetivos. Generalmente se atribuye a los científicos el descubrimiento del conocimiento; mientras que corresponde al ingeniero y al tecnólogo concebir las creaciones e invenciones, que son realizaciones originales.

Entonces ¿qué hace el ingeniero de estructuras?

El ingeniero de estructuras, como tareas fundamentales, concibe, analiza, planifica, calcula, diseña y construye todo tipo de estructuras como puentes, edificios, presas,

etc. Para ello se sustenta en la mecánica teórica, como ciencia pura y las llamadas ciencias de la ingeniería como ciencias aplicadas tales como la estática y la resistencia de materiales, además de otras.

Veamos, a continuación, en el contexto epistemológico, cuáles son los métodos que usa el ingeniero de estructuras para realizar sus tareas fundamentales.

En primer lugar, la concepción, el diseño y construcción de una estructura responde a una necesidad, individual o colectiva. Por ejemplo, un hospital como edificio y sistema estructural, se concibe sobre la base de las necesidades de una comunidad, ciudad o región, un grupo social. Análogamente sucede con un puente, una presa y otro tipo de estructuras. Esto quiere decir que, el ingeniero de estructuras y la ingeniería en general recurren al **empirismo**, corriente del pensamiento científico que ha jugado un rol fundamental en el desarrollo de la ciencia.

Detectadas las necesidades colectivas, el ingeniero concibe en su mente a la estructura, para lo cual recurre al mismo trabajo de campo, mediciones, cálculos matemáticos, etc. Al concebir y modelar la estructura, el ingeniero está utilizando otra corriente del pensamiento científico conocida como el **racionalismo**. Es decir, el ingeniero de estructuras también usa el método racional principalmente para concebir, modelar y diseñar la estructura.

Pero, como si fuese poco, la ingeniería de las estructuras, sus principios y leyes, están fuertemente sustentadas en ensayos de laboratorio. No es casual que prácticamente todas las universidades implementen importantes laboratorios de resistencia de materiales, tecnología del hormigón y mecánica de suelos, para citar algunos. Esto nos conduce a establecer, incuestionablemente, que la ingeniería de estructuras aplica el **método experimental**.

En suma, las tres corrientes del pensamiento científico mencionadas, quizá las más importantes, empirismo, racionalismo y experimentación, además de otras, están siempre presentes en la ingeniería de estructuras.

Otro método que usa la ingeniería de estructuras es la **modelación**. Esta puede ser matemática, física, conceptual, etc. Hay muchos ejemplos de la modelación matemática en la ingeniería de estructuras; solamente vamos a indicar que muchos de los fenómenos físicos que trata la ingeniería estructural se pueden modelar matemáticamente mediante ecuaciones algebraicas y ecuaciones diferenciales ordinarias o parciales; estas ecuaciones, especialmente las ecuaciones diferenciales parciales que no tienen solución analítica, se resuelven mediante métodos numéricos como el método de los elementos finitos y el método de las diferencias finitas. La modelación física tiene una estrecha relación con la experimentación referida anteriormente, ya que muchas estructuras se modelan físicamente a escalas apropiadas para ser probadas en laboratorio y, de esa manera, se determinan, además, las propiedades mecánicas de los materiales de los que está compuesto la estructura.

Finalmente, la ingeniería de estructuras goza de las muchas propiedades generales de la ciencia. Así, por ejemplo:

- La ingeniería estructural es predictiva porque predice el comportamiento de las estructuras. Por ejemplo, la ecuación general de la elástica permite predecir la deflexión o deformación por flexión de una viga. Esta deformación, predicha racional o teóricamente, puede ser comprobada experimentalmente.
- La ingeniería estructural es legal, nos referimos a la legalidad científica, porque se sustenta en las leyes y principios de la mecánica teórica y las diferentes ciencias de la ingeniería.

- La ingeniería estructural es analítica porque muchas estructuras deben descomponerse en partes para poderse analizar y luego recomponerla para tener el comportamiento global de la misma. Este es uno de los fundamentos del método de los elementos finitos.
- La ingeniería estructural es clara y precisa. Quizá las diferentes ramas de la ingeniería son las más objetivas en el ámbito de la ciencia. No dependemos de corrientes o tendencias subjetivas del pensamiento como ocurre con las llamadas ciencias sociales. En la ingeniería estructural casi todos los fenómenos son susceptibles de mediciones y comprobaciones.
- Por la misma razón citada en el párrafo que precede, el conocimiento científico en la ingeniería estructural es verificable.
- La ingeniería estructural es metódica porque, además de usar el método general de la ciencia para producir nuevos conocimientos, utiliza sus propios métodos para resolver problemas específicos. Esto lo hace tanto en las ciencias aplicadas como en la tecnología.
- La ingeniería estructural es sistemática. No se olvide que el sustento científico de esta rama de la ingeniería es la mecánica, la misma que es una teoría científica compuesta por leyes y principios conectados entre sí. Pero, además, la mecánica teórica, al no ser suficiente para resolver los problemas prácticos de la ingeniería de estructuras, se relaciona con los principios y leyes de las llamadas ciencias de la ingeniería como la estática y la resistencia de materiales.
- La ingeniería estructural es útil. Ya nos referimos a que la diferencia entre el científico y el ingeniero es que el primero conoce por conocer, en tanto, el segundo conoce para hacer. He aquí la utilidad del ingeniero estructural.
- La ingeniería estructural es abierta. Es decir, no reconoce barreras que limiten el conocimiento, el cual está permanentemente sujeto a modificaciones, innovaciones y nuevos descubrimientos. Así como el método científico es falible, la ingeniería estructural también lo es y, a la vez, es perfectible.

CONSIDERACIONES FINALES Y CONCLUSIONES

- La riqueza del ingeniero estructural, como las otras ramas de la ingeniería civil, radica en su tránsito por las **ciencias puras** como la física (especialmente la mecánica), las **ciencias aplicadas** (como resistencia de materiales, la mecánica de suelos, la teoría de la elasticidad y otras) y la **tecnología**, la misma que se asocia a la producción de bienes y servicios tales como la construcción de puentes, edificios para diferentes fines, etc.
- La presencia indiscutible de los principios fundamentales de la mecánica, las leyes del movimiento de Newton, en la solución de los problemas más representativos de la ingeniería estructural, conduce a establecer que ellas constituyen el sustento científico de esta rama de la ingeniería civil. Es decir, las leyes de la mecánica son también las leyes de la ingeniería civil, aunque, como se ha dicho, no son suficientes. Por ello se originan las ciencias aplicadas específicas de la ingeniería o ciencias ingenieriles como la resistencia de los materiales.
- Si se hace una analogía con el ejemplo mencionado por Bunge, referido a la botánica y a los recursos vegetales, y, si se consideran las características de la ingeniería estructural, en términos de una de sus principales disciplinas, la

resistencia de los materiales, se tiene que: quienes estudian las leyes de Newton hacen mecánica o ciencia pura, y quienes estudian la aplicación de estas leyes al estudio y diseño de los cuerpos deformables hacen mecánica aplicada o resistencia de materiales. Si la resistencia de materiales y otras disciplinas de la ingeniería estructural se aplican al diseño y construcción de estructuras de interés práctico o beneficio colectivo, estamos en presencia de la tecnología (producción de bienes y servicios).

- En consecuencia, la ingeniería estructural puede definirse, como una ciencia o un conjunto de ciencias aplicadas porque aplica las leyes de la mecánica, y las matemáticas. Pero, al mismo tiempo es una tecnología porque utiliza el conocimiento científico, agregando nuevos conocimientos inherentes a sus propios problemas, para planear acciones de interés social utilizando criterios de optimización, es decir, máximo aprovechamiento y seguridad a costo mínimo. Estas acciones consisten en el estudio, diseño, análisis, cálculo, dirección y construcción de todo tipo de estructuras, tales como puentes, edificios, presas, etc.
- Puede afirmarse, entonces, que las leyes de la mecánica, en conexión con las propias leyes de las ciencias ingenieriles, como la resistencia de materiales, son también las leyes de la ingeniería estructural.
- La ingeniería estructural, con sus propias particularidades, usa el método general de la ciencia o método científico y goza de las características generales propias de la ciencia. Por ello, la ingeniería estructural puede ser incluida en la categoría científica, además de la tecnológica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Benítez, A. (2001). **¿Cuáles son las leyes de la ingeniería civil?**. XXVII Convención de la Unión Panamericana de Asociaciones de Ingenieros, UPADI 2001, Santa Cruz de la Sierra, Bolivia.
2. Timoshenko, S.P. (1983). **History of Strength of Materials**. Dover Publications, New York, USA.
3. Bunge, M. (1989). **La investigación científica**. Editorial Ariel, S.A., Barcelona.
4. Bunge, M. (2005). **La ciencia, su método y su filosofía**. Editorial Sudamericana, Buenos Aires.
5. Bunge, M. (1982). **Ciencia y desarrollo**. Siglo XX, Buenos Aires.
6. Gutierrez, R. (1996). **Introducción al método científico**. Editorial Esfinge, S.A. de C.V., México.
7. Goicolea, J. (2001). **Curso de mecánica, volumen I**. Universidad Politécnica de Madrid.
8. Hibbeler, R.C. (1998). **Mecánica de materiales**. Prentice Hall, México.
9. Cuevas, A. (2003). **Las ciencias ingenieriles como “ciencias para la aplicación”**. **El caso de la resistencia de materiales**. Argumentos de la razón técnica, 6, pp. 161-180.
10. Guy, K. (2006). **Philosophy of engineering**. The Royal Academy of Engineering, London.
11. Aracil, J. (2006). **Ingeniería y pensamiento**. Fundación El Monte, Sevilla.
12. Radelat, G. (1992). **Metodología de la investigación para ingenieros de vías**. Medellín, Colombia.