

PRINCIPIOS DIALÉCTICOS DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Benítez Reynoso, Alberto
Ingeniero Civil, M.Sc., M.E., Ph.D.
Tarija (Bolivia)
Docente Departamento de Estructuras
Universidad Autónoma J.M. Saracho
al_be_rey@hotmail.com
benitez1@entelnet.bo

RESUMEN

Si la dialéctica es la ciencia que trata de las leyes más generales del desarrollo de la naturaleza, de la sociedad y del pensamiento humano¹, si la Ingeniería Estructural se sustenta científicamente en una ciencia natural (la Mecánica) y, si Engels² en su "Dialéctica de la Naturaleza", ha identificado muchos fenómenos naturales que pueden ser explicados mediante esas leyes, podemos plantear el problema con la siguiente pregunta: ¿Cómo formular algunos principios dialécticos de la Ingeniería Estructural?

Luego, el objetivo principal de este artículo es: "Formular algunos principios dialécticos de la Ingeniería Estructural, que permitan interpretar, de una manera alternativa, los fenómenos, principios y funciones más relevantes esta rama de la Ingeniería".

Se usa método dialéctico en sus diferentes vertientes (Tesis-Antítesis-Síntesis, leyes de la dialéctica y tránsito de lo abstracto a lo concreto) para formular los mencionados principios, es decir, se usa la metodología dialéctica.

Los resultados fundamentales consisten en la formulación de diez principios dialécticos de la Ingeniería Estructural, usando categorías dialécticas propias de esta rama de la Ingeniería.

Como conclusión principal, se tiene que, la dialéctica permite la interpretación alternativa de los fenómenos, principios y funciones de la Ingeniería Estructural.

ABSTRACT

If dialectics is the science that treats the general development laws of nature, society and human thinking¹, if the structural engineering is scientifically based on a natural science (Mechanics) and, if Engels² in his "Dialectics of Nature" identified many phenomena that can be explained by these laws, the problem can be stated by the question: How to formulate some dialectic principles of Structural Engineering?

Then, the objective is: to formulate some dialectic principles of Structural Engineering that allows to interpret alternatively the main phenomena, principles and functions of this branch of Engineering. For that purpose, the dialectic method is used.

The results of the paper is concentrated in the formulation of ten "dialectic principles of Structural Engineering", using dialectic categories of this branch of Engineering.

As conclusion, is stated that the dialectics allows the alternative interpretation of the main phenomena, principles and functions of Structural Engineering.

INTRODUCCIÓN

A través de la historia se puede evidenciar que tanto los educadores como los científicos e ingenieros de estructuras dedicados al diseño y construcción, han hecho esfuerzos por mejorar el "Proceso Enseñanza Aprendizaje" de la Ingeniería Estructural. No obstante y a pesar de los poderosos instrumentos de cálculo disponibles en la actualidad, parece que el proceso de asimilación de los conocimientos esenciales, principios fundamentales y leyes más generales de esta rama de la Ingeniería, es aun inapropiado.

En los centros de educación superior se percibe una tendencia a formar ingenieros que privilegien el cálculo mecánico de estructuras, subestimando la reflexión, el pensamiento y su "movimiento", en fin, la filosofía de la Ingeniería Estructural.

Hoy por hoy, se tienen Ingenieros de Estructuras más hábiles para calcular que para reflexionar, es decir, se ha mecanizado tanto la mente del Ingeniero que la práctica de la reflexión y el pensamiento filosófico sobre las estructuras no es común en las aulas universitarias.

Consiguientemente es bueno preguntarse si queremos ingenieros que solamente diseñen y calculen las estructuras o, que también las reflexionen, entiendan, y piensen, de manera que el cálculo sea una consecuencia de este pensamiento. Al emplearse mucho menos tiempo que antes en el cálculo de las estructuras y al facilitarse el mismo, por la disponibilidad de computadoras de alta capacidad y velocidad, parece interesante, útil y hasta productivo formar ingenieros de estructuras que, en la práctica profesional, también hagan filosofía de las mismas, lo que significa comprenderlas a profundidad, reflexionar sobre sus formas, mecanismos resistentes, evolución histórica, métodos de cálculo y construcción, etc. En consecuencia, la formulación de unos "principios dialécticos de la Ingeniería Estructural", usando el método dialéctico, además de interpretar los fenómenos relacionados directamente al análisis, diseño, cálculo y construcción de estructuras de una manera alternativa, permitirá al estudiante y al profesional comprender la dinámica o movimiento, tanto de los conceptos como del objeto de estudio de la ingeniería estructural, que son las estructuras compuestas de diferentes materiales. De esta manera, tendremos ingenieros que vamos a llamar, *conceptualistas*, es decir, que, además de calcular, comprendan y dominen la esencia y los principios fundamentales de los fenómenos estructurales y no ingenieros que llamaremos *calculistas* que manejan las tácticas de cálculo, pero, se *olvidaron de pensar*, por decirlo de alguna manera; a estos últimos podríamos denominarlos ingenieros *tácticos*.

Precisamente, para establecer una reconciliación entre la filosofía y la Ingeniería Estructural, usamos el método dialéctico para formular los principios mencionados y, de esta manera, fomentar el uso de la filosofía en la concepción y diseño de las estructuras de ingeniería.

El objetivo principal de este artículo es: "Formular algunos principios dialécticos de la Ingeniería Estructural, que permitan interpretar, de una manera alternativa, los fenómenos, principios y funciones más relevantes esta rama de la Ingeniería".

METODOLOGÍA

Para la consecución del objetivo propuesto se ha utilizado la metodología materialista dialéctica, expresada en el llamado método dialéctico en sus tres versiones más conocidas, a saber:

- Ascensión de lo abstracto pensado a lo concreto pensado y concreto sensible (Marx).
- Tres leyes de la dialéctica de Engels (interpenetración de los contrarios, paso de la cantidad a la cualidad y viceversa, negación de la negación).
- La llamada triada hegeliana Tesis-Antítesis Síntesis.

Por razones de extensión, en el presente artículo no vamos a presentar el detalle del método dialéctico tal y como ha sido referido anteriormente. Esto se puede encontrar en la literatura especializada sobre filosofía dialéctica^{3,4,5}.

RESULTADOS

Los principios dialécticos de la Ingeniería Estructural, presentados a continuación, forman parte de la Dialéctica de la Ingeniería Estructural formulada por el autor⁶.

Si consideramos que la dialéctica general está constituida un conjunto de leyes que gobiernan la naturaleza y el pensamiento, los "principios dialécticos de la Ingeniería Estructural", van a constituirse en un subconjunto de de aquel.

Sin embargo, consideramos que, de manera previa, es pertinente establecer, con fundamentos, si estos enunciados pueden llamarse principios, leyes o podrían tener un nombre similar, equivalente o diferente.

Comencemos con el concepto de ley. Para Bunge⁷, se deben distinguir cuatro significados diferentes del término "ley", a saber:

- 1) Ley₁ o pauta objetivo estable: una regularidad en la naturaleza o en la sociedad.
- 2) Ley₂ o enunciado Legal: una conceptualización de una ley 1.
- 3) Ley₃ o enunciado monoprágmatco: una regla basada en una o más leyes.
- 4) Ley₄ o enunciado metalegal: una condición que satisface o debe satisfacer un conjunto de leyes 2.

Para otros, como Gutierrez⁸, por ley científica se entiende *una relación constante entre dos o más hechos o fenómenos*. Aunque, también puede ser una relación entre dos o más variables que caracterizan esos fenómenos. Por ejemplo, en la Ingeniería Estructural, se tienen varias leyes; así, la ley de Hooke, tal como se expresa hoy, establece una relación entre dos variables, a saber: los esfuerzos (causa) y las deformaciones unitarias (efecto); estas dos variables representan un fenómeno, la elasticidad de algunos cuerpos que tienen ese comportamiento. El mismo autor, señala que, cuando una hipótesis se ha comprobado por cualquiera de los procedimientos científicamente usuales (racional, experimental), el resultado que se obtiene es una ley científica.

Hay otros términos que han sido considerados como alternativas, para ser usados. Estos términos y sus definiciones, se mencionan a continuación⁹:

- Aforismo.- Es uno de los posibles modos de expresión en la filosofía. en su mayor parte, los aforismos versan sobre asuntos de carácter moral. Pero, en esta tesis nos interesan los aforismos como forma de expresión y exposición. Su característica común es la de presentar pensamientos filosóficos en una forma breve, concentrada y cerrada, de modo que cada pensamiento posea una relativa autonomía. Por ello, se hace difícil distinguir entre un aforismo y un pensamiento. El aforismo se distingue del pensamiento en que, mientras en el primero las afirmaciones están enunciadas con pretensión de validez,, en el segundo se trata más bien de un "muñón que pide continuarse". Así, el aforismo pretendería ser completo, en tanto que, el pensamiento sería constitutivamente incompleto. El aforismo filosófico tiene una pretensión de verdad, y aún a veces

aspira a expresar la verdad de un modo más conciso y compacto que otras formas de exposición, a las cuales acusa de prolijidad. Se puede concluir, en consecuencia, que el aforismo es justificado en la filosofía, no necesita siempre un lenguaje exhortativo o confinarse a temas de carácter moral.

- Axioma.- Un significado originario de este término es *dignidad*. Entonces, por derivación, axioma significa lo que es digno de ser estimado, creído o valorado. De este modo, en su acepción más clásica el axioma equivale al principio que, por su dignidad misma, es decir, por ocupar un cierto lugar en un sistema de proposiciones, debe ser estimado como verdadero. Para Aristóteles, axioma tiene aún este significado: los axiomas son principios evidentes que constituyen el fundamento de toda ciencia. En tal caso, los axiomas son proposiciones irreductibles, principios generales a los cuales se reducen todas las demás proposiciones, El axioma posee, por así decirlo, un imperativo que obliga al asentimiento una vez enunciado y entendido.
- Postulado.- Un postulado, según Aristóteles, es una proposición no universalmente admitida, o sea, no evidentes por sí mismas. Con esto, los postulados se distinguen de los axiomas, pero también de ciertas proposiciones que se toman como base de una demostración, pero que no tienen un alcance universal. En *los Elementos* de Euclides la noción de postulado recibió una formulación que ha sido vigente durante muchos siglos: el postulado ha sido considerado en ellos como una proposición de carácter fundamental para un sistema deductivo que no es, como el axioma, evidente por sí mismo y no puede, como el teorema, ser demostrada. La mayor parte de los autores consideran hoy que no puede mantenerse la diferencia clásica entre axioma y postulado y aún entre postulado y teorema en sentido general. En primer lugar, lo que califica de axioma puede llamarse postulado. En segundo término, los postulados pueden ser considerados simplemente como teoremas iniciales en una cadena deductiva.
- Principio.- Para algunos presocráticos principio sería aquello de lo cual derivan todas las demás cosas. Principio sería, entonces, principio de realidad. Pero, en vez de mostrar una realidad y decir de ella que es el principio de todas las cosas, se puede proponer una razón por la cual las cosas son lo que son. Entonces, el principio no es el nombre de ninguna realidad, sino que describe el carácter de cierta proposición: la proposición que "da razón de". Una definición clásica establece que principio es cualquiera de las proposiciones o verdades por fundamentales por donde se empiezan a estudiar las ciencias o las artes, o también, base, origen, razón fundamental sobre la cual se procede discurrendo en cualquier materia. También se han llamado axiomas o postulados.

En consecuencia, analizando cada uno de los términos mencionados, consideramos que el nombre de *principios dialécticos de la ingeniería estructural* es apropiado en este caso.

Se presenta, en cada caso y en primer lugar, una argumentación y, en segunda instancia, se plantea el principio, mismo que interpreta, en términos dialécticos y a modo de síntesis, las funciones, fenómenos, principios, medios, métodos, teorías y la misma práctica histórico-social, referidos a la Ingeniería Estructural.

Principio 1: Función principal de la Ingeniería y el Ingeniero Estructural

La evolución histórica de la Ingeniería Estructural, nos conduce a establecer categóricamente que esta rama de la Ingeniería y su actor principal, el Ingeniero

Estructural, han desarrollado, con mayor énfasis, dos de sus componentes principales, a saber:

- 1) La teoría, entendida como el sustento científico, principios, ecuaciones, modelos, etc., medios mediante los cuales se "conciben" o "piensan" las estructuras a través de un proceso dialéctico. En este contexto, el sistema estructural (edificio, puente, presa, etc.) es idealizado en la mente del ingeniero y se llamará *abstracto pensado*. Lo abstracto pensado dentro de la ingeniería estructural, además, no es otra cosa que un cuerpo doctrinario o sistema de ideas que se han desarrollado a lo largo de muchísimos años de teorización y experimentación. La evolución histórica de la Ingeniería Estructural, constituye una prueba de lo afirmado. Dentro de la teoría o principios que gobiernan la Ingeniería estructural, como ejemplos, se tienen:
 - La mecánica clásica y la mecánica del medio continuo, como sustentos científico de la Ingeniería Estructural.
 - La teoría de la elasticidad y la plasticidad que hoy por hoy se siguen utilizando para estudiar el comportamiento de las estructuras y diseñarlas en varios tipos y formas.
 - Si en la antigüedad no se conocía el método de los Elementos Finitos para analizar estructuras, hoy es uno de los elementos teóricos más fuertes y de mayor divulgación y aplicaciones en el campo de la Ingeniería Estructural, especialmente para construir instrumentos, algoritmos y programas informáticos que sintetizan y simplifican el trabajo del ingeniero de estructuras.
 - Si nos remitimos a los diferentes materiales de los que están compuestos las estructuras, por ejemplo, madera, hormigón y acero, nadie pone en duda que se han desarrollado, a través de los años, teorías y principios que rigen el cálculo y diseño al respecto.
- 2) La práctica histórico-social, demuestra que la Ingeniería y el Ingeniero Estructural, para satisfacer las demandas de las sociedades, no se limitan a concebir, pensar y teorizar estructuras, sino que, además, las materializan en la realidad como objetos físicos que pueden ser percibidos por los sentidos humanos. A estos objetos físicos, que pueden ser hechos de diferentes materiales (naturales, artificiales o mixtos), los llamaremos *concreto sensible*. Al plantear el primer principio dialéctico de la Ingeniería Estructural se puede verificar, por ejemplo, cómo la vivienda, compuesta por estructuras mecánicas, ha evolucionado desde la cueva natural hasta la que conocemos hoy, sin desconocer la evolución de los edificios y los demás tipos de sistemas estructurales que se conocen. Lo concreto sensible en la Ingeniería estructural se refleja objetivamente en las estructuras y sistemas estructurales existentes que todo el mundo puede *ver* y *tocar*, desde las pirámides de Egipto, los templos de los mayas y del Tiahuanaco, hasta los más modernos edificios, rascacielos, torres, faros y demás estructuras como puentes de los más diversos tipos y formas, represas, muros de sostenimiento, depósitos elevados, carreteras, etc., etc.

En ese marco, usando los dos términos dialécticos (abstracto pensado y concreto sensible), se plantea el siguiente principio (función principal de la Ingeniería Estructural), de la siguiente manera:

La función principal de la Ingeniería Estructural y su actor principal, el ingeniero de estructuras, es la transformación de lo abstracto pensado (concebir, pensar, crear,

diseñar, teorizar y calcular estructuras) en lo concreto sensible (construir materialmente estructuras y sistemas estructurales complejos).

Principio 2: Estructuras artificiales y estructuras naturales

La naturaleza probablemente ha servido de ejemplo durante toda la historia del hombre en los procesos de diseño y construcción de estructuras. La naturaleza, como constructora, nos ha dejado ver las formas y estructuras más sofisticadas y sostenibles, por lo que su estudio, su aplicación y su imitación son la razón de ser de muchas ramas del conocimiento científico y tecnológico.

Todo empezó cuando el ser humano, consciente o inconscientemente, comenzó a entrar en cuevas o construir refugios similares, de ahí en adelante el ser humano ha usado su capacidad creativa y su habilidad manual para construir refugios que le ofreciesen mayores garantías de supervivencia, hasta llegar a concebir, diseñar y construir las viviendas que hoy conocemos. En este caso, las cuevas naturales, pasando por las chozas de las tribus e indígenas, fueron la fuente de inspiración de ingenieros y arquitectos, hasta llegar a las modernas y cómodas viviendas que hoy conocemos. Fue en el siglo XX, cuando comenzaron a usarse materiales de construcción generados de forma industrial y al generalizarse el uso de éstos, el hombre perdió de vista su capacidad de construirse un refugio para él y su familia.

Pero, históricamente, han habido otras fuentes de inspiración que han permitido concebir, diseñar y construir otras formas y tipos de estructuras; veamos algunas de éstas, como ejemplos, en los párrafos que siguen.

- Sin duda alguna, la estabilidad estructural los árboles, que son una parte fundamental del reino vegetal, ha conducido a los ingenieros estructurales a diseñar y construir estructuras artificiales similares. Un faro, una torre, un tanque elevado, son imitaciones a un árbol, el mismo que, desde el punto de vista de la ingeniería de estructuras funciona como una columna empotrada en el extremo inferior y libre en el superior. Pero el ser humano fue más allá, hasta llegar a diseñar y construir edificios tan altos que no dejan de impresionar a toda la humanidad.
- La liana es una planta de las selvas tropicales cuya característica principal es su flexibilidad y longitud, comportándose como una cuerda flexible. Esta planta puede considerarse, sin lugar a dudas, como la fuente de inspiración de los ingenieros para la concepción, diseño y construcción de estructuras de cables flexibles como los puentes colgantes y cubiertas de grandes luces con cables en las tres direcciones del espacio.
- Y nos seguimos sorprendiendo cuando un panal de miel, construido por las abejas, dada su estructura estable, ha generado iniciativas conducentes a concebir, diseñar y construir elementos estructurales llamados alveolares, tales como vigas, losas, muros y otros. Estos elementos tienen una serie de ventajas frente a los tradicionales como la disminución del peso, lo cual influye en las dimensiones de los demás elementos como las fundaciones, el costo, su fácil colocación cuando son prefabricados, etc.
- Las ramas de los árboles se comportan como si fuesen perfectas vigas en voladizo o ménsulas, tal y como las ha concebido el propio Galileo.
- Si hacemos referencia a los esqueletos de los muchos animales vertebrados, la situación no es tan diferente. Por ejemplo el tronco y la caja torácica de la mayoría de ellos puede ser considerado como una viga apoyada. Esto es más

evidente en el caso del caballo, en el cual, los huesos y las costillas son las barras a compresión de una muy elaborada viga tipo Fink.

- Basta apreciar y examinar una telaraña para darse cuenta que la misma ha servido para que el ingeniero conciba, diseñe y construya estructuras semejantes, tal y como las estructuras de cables en dos y tres direcciones del espacio, mismas que tienen un amplio espectro de aplicaciones en estructuras de grandes luces, cubiertas de edificaciones especiales como las deportivas y otras.
- Si observamos un murciélago, comprenderemos que la semejanza entre la estructura de sus alas y algunas estructuras artificiales de la ingeniería, es muy evidente. Muchas de estas estructuras se parecen a la estructura membranal de las alas y los dedos de estos animales.
- Si nos remitimos a las estructuras hidráulicas, también debemos admitir que el ser humano, los ingenieros, hemos intentado imitar a un río cuando diseñamos y construimos canales para transportar agua para diferentes fines (consumo humano, riego, etc.). Incluso modificamos a gusto y según nuestras propias necesidades el régimen hidráulico de un canal.
- En fin, hay muchos ejemplos más a través de los cuales se ratifica nuestra posición sobre la imitación a las estructuras naturales, que por razones de extensión no los mencionamos.

A manera de síntesis, se puede afirmar categóricamente que las estructuras de ingeniería o *estructuras artificiales*, que podemos llamar estructuras mecánicas (porque se sustentan en las leyes de la mecánica), tienen grandes paralelismos con las estructuras o paralelismos con las *estructuras naturales*, que también siguen las leyes de la naturaleza.

¿Porqué imitar a las estructuras naturales?, porque entre las estructuras naturales y las artificiales (construidas por el ser humano), hay elementos comunes, a saber:

- ✓ Ambos tipos de estructuras, naturales y artificiales, están gobernadas por las leyes de la naturaleza, en particular, las leyes de la Mecánica de Newton, que constituyen el sustento científico de la ingeniería estructural.
- ✓ Todas las estructuras artificiales de ingeniería se construyen utilizando materiales que proporciona la propia naturaleza. Solo mencionemos los tres materiales más usados en el mundo: madera, hormigón (cemento, áridos y agua) y hierro.
- ✓ Tanto las estructuras naturales como las artificiales tienen que resistir fuerzas actuantes, unas que provienen de la propia naturaleza (vientos, sismos, inundaciones, etc.) y otras que son provocadas por el ser humano.

Por todo lo mencionado en los párrafos precedentes, como ejemplos elocuentes de "cómo el ser humano en general" y los ingenieros de estructuras en particular, imitamos a la naturaleza, planteamos el siguiente principio:

La ingeniería estructural y el ingeniero conciben, diseñan y construyen estructuras simples y sistemas estructurales artificiales complejos imitando a las estructuras y sistemas estructurales naturales existentes, vegetales, animales y minerales.

Principio 3: El diseño estructural; un proceso dialéctico de aproximaciones sucesivas

En el proceso del diseño de una estructura simple o un sistema estructural complejo intervienen una serie de variables y factores que condicionan la concepción, diseño y construcción de las mismas. Se dice que, incluso el "capricho" o "gusto" del

ingeniero proyectista, es determinante a tiempo de establecer las formas y tipos estructurales, criterios de diseño, métodos de cálculo y otros.

En el mencionado proceso, no todas las variables y factores se toman en cuenta de manera apropiada. Por ejemplo, el "movimiento" a que están sujetos, tanto las ideas como la ejecución material de las estructuras no son adecuadamente considerados. Es decir, se producen cambios tanto en el nivel de la abstracción como en la concreción, los cuales influyen notablemente en el proceso.

Varios autores han sugerido una lógica o secuencia que debe contemplar un procedimiento de diseño de una estructura simple o un complejo estructural.

Así, Ambrose¹⁰ se refiere al diseño de estructuras de edificios y que el proceso de diseño comprende una serie de pasos o etapas, las cuales son:

- Inicio, motivación y necesidad;
- Análisis del problema;
- Consideración de opciones;
- Selección del esquema de solución;
- Realización detallada de la solución;
- Presentación visual de la solución para comunicarla al cliente y al constructor;
- Proceso de construcción;
- Ocupación y uso;
- Evaluación en uso;
- Retroalimentación.

Por su parte, Vinnakota¹¹ define el diseño conceptual de un edificio como una serie de pasos que consideran desde el diseño arquitectónico, el diseño y cálculo estructural (Ingeniero) hasta la confección o elaboración de los planos de diseño estructural que, finalmente, posibilitarán la construcción.

Prácticamente todas las secuencias o lógica de diseño tienen la misma estructura como las dos mencionadas en los párrafos precedentes.

Los dos casos citados anteriormente, referidos al diseño y construcción de edificios, corresponden a ámbitos de actuación donde intervienen tanto arquitectos (diseño arquitectónico) como ingenieros de estructuras (cálculo y diseño estructural), sin embargo, hay muchas otras estructuras y sistemas estructurales complejos en los cuales la participación del arquitecto es mínima o ninguna, es decir, el Ingeniero estructural es el protagonista. Nos referimos a los sistemas estructurales de puentes, túneles, depósitos, presas, teleféricos, etc. En estos otros sistemas estructurales, si bien hay elementos comunes con los edificios, especialmente los de tipo general, hay otros que son inherentes a estos sistemas solamente. La comparación entre un puente y un edificio refleja sus pocas similitudes y sus muchas diferencias. Similar situación ocurre cuando se compara una vivienda con un túnel o con una estructura hidráulica como un canal para conducir agua, una represa o una piscina.

Se pueden hacer críticas y comentarios positivos a estos esquemas lógicos de diseño de estructuras, sin embargo, considerando que han tenido su utilidad en un momento histórico-social concreto, en este artículo, dado su fundamento teórico y filosófico que se sustenta en la dialéctica, expresada en sus leyes, categorías principales y el método dialéctico, se plantea una lógica de diseño estructural basada precisamente en este sustento.

Esta lógica (dialéctica) de concepción y diseño de estructuras se fundamenta en los párrafos que siguen.

a) En primer lugar, tal como lo establece el método y pensamiento dialécticos, fuera del investigador (ingeniero de estructuras) e independientemente de él, existe

una realidad concreta, la misma que en el caso de la ingeniería estructural, podríamos decir que está compuesta de los siguientes elementos:

- Un espacio o lugar físico, es decir, una parte de la superficie terrestre, donde se emplazará o ubicará el sistema estructural diseñado por el ingeniero. Este espacio tiene sus características naturales que, reiteramos, son independientes del ingeniero de estructuras.
- Una realidad que responde a un momento histórico-social concreto, puede ser el momento actual como fueron los pasados y como serán los futuros. Esta realidad tiene sus propias características como el *estado del arte* en la ciencias y tecnologías inherentes a la ingeniería estructural, las demandas de una sociedad para satisfacer sus necesidades, dentro de las cuales se incluyen a los sistemas estructurales. Además, hay un entorno, un medio ambiente y recursos naturales que proteger. Dentro de esta realidad, también se encuentran los sistemas estructurales construidos, que, aunque han sido construidos por el ser humano, es decir, son artificiales, también son una realidad concreta, existen y son parte de la práctica de la Ingeniería Estructural.

b) Se tiene una praxis y una teoría en la concepción, diseño y construcción de estructuras que, si bien pertenece al momento histórico-social concreto, referido en el párrafo anterior, la mencionamos de manera independiente porque tiene sus propias particularidades que evolucionan permanentemente. Es decir, hay todo un acervo de conocimientos teóricos y prácticos, así como diferentes cuerpos doctrinarios que permiten la concepción y el diseño de estructuras basados en el conocimiento científico y tecnológico, los cuales son aceptados por la comunidad científico-técnica ingenieril como paradigmas y seguirán siendo válidos hasta que otros los sustituyan, es decir hasta que hayan nuevos conocimientos que sean contrarios (o no) a los actualmente existentes. Este aspecto es clave en la dialéctica del pensamiento ingenieril, ya que, como todo pensamiento científico, es dinámico. A este mundo, al mundo de las ideas, lo llamaremos *mundo conceptual o teórico de la Ingeniería Estructural*.

En consecuencia, en el marco de la Ingeniería Estructural, objeto de estudio de esta investigación, queda absolutamente claro que hay un mundo real, una realidad concreta, que existe independientemente del ingeniero de estructuras y de cualquier ser humano al margen de su formación, inclinaciones, habilidades, tendencias, experiencias, etc. y un mundo conceptual compuesto del acervo de conocimientos hasta la actualidad y que puede crearse.

Sobre las dos premisas citadas anteriormente, que siguen la corriente del método dialéctico, se plantea, de manera sintética, una nueva lógica general de diseño de estructuras, que se llamará *lógica dialéctica del diseño de estructuras*.

Si se sigue la secuencia del método dialéctico, la lógica o método general de análisis y diseño de estructuras es como sigue:

(1) Hay una realidad concreta compuesta fundamentalmente de los siguientes elementos:

- La realidad social, cultural e histórica que demanda la construcción del sistema estructural, destinado a resolver un problema determinado.
- El espacio natural en el que se emplazará o ubicará el sistema estructural a construirse, el mismo que tiene sus propias características, las cuales son independientes del ingeniero de estructuras. Estas características se relacionan con el clima, la geología, geomorfología y geotecnia del sitio, la hidrología, la meteorología, etc., etc.

- Las estructuras naturales, ya que, como se dijo, al plantear el principio 2, fueron, son y seguirán siendo fuente de inspiración de los ingenieros y arquitectos que conciben, analizan, diseñan y calculan sistemas estructurales, desde los más simples hasta los más complejos.
- Todos los sistemas estructurales existentes, aunque han sido construidos por el ser humano, son parte de lo real concreto existente. Son las que llamamos estructuras artificiales.

Entonces, para seguir la lógica del método dialéctico, estos elementos constituyen lo real concreto (existente).

- (2) Al plantearse el problema mencionado de manera general en el punto precedente, y al tener una visión global de la situación real concreta, el ingeniero de estructuras, inicialmente, tiene una representación plena de esta realidad, es decir, se imagina una o varias posibles soluciones, pero, como una representación caótica, sin un orden establecido y donde el ingeniero aún no ha usado su selección, criterios y categorías teóricas, tanto existentes como las por crearse, dependiendo de las características del problema particular. Es decir, lo real concreto le permite al ingeniero tener una visión aún desordenada e incoherente de la (s) posible (s) solución (es) al problema planteado, le permite concebir un modelo estructural inicial.
- (3) Al recurrir al cuerpo doctrinario teórico, sus categorías principales, tanto las existentes como las que podrían crearse como consecuencia de las características del problema, el ingeniero entra a la fase del análisis y de las determinaciones abstractas. Entre estas determinaciones y categorías, se tienen, por ejemplo, las formas (geometría) y tipos estructurales, las acciones, reacciones y desplazamientos de los elementos estructurales, las respuestas estructurales de estas formas expresadas en términos de los esfuerzos y deformaciones internos, las dimensiones de los elementos que componen el sistema estructural, las propiedades de los posibles materiales a ser empleados en el proyecto estructural, etc., etc. En esta etapa de abstracción, las matemáticas y la teoría de las estructuras juegan un rol fundamental.
- (4) En esta fase de la construcción del conocimiento o del proceso de diseño estructural, desde el punto de vista dialéctico, el ingeniero reconstruye su pensamiento, considera todas las categorías teórico-conceptuales de la fase anterior, establece relaciones entre ellas, intentando reproducir lo concreto pensado pero esta vez conformando una presentación ordenada del sistema estructural pensado. Es decir, las determinaciones abstractas (análisis) conducen al planteamiento ordenado de una o más soluciones, traducidas en el planteamiento de un sistema estructural concreto (síntesis). Lo que significa que, en este nivel, el ingeniero pasa a la totalidad (construida y pensada) concreta que puede llamarse lo concreto pensado. Esta totalidad concreta pensada es el puente, el edificio, el teleférico, etc., que el ingeniero ha concebido en su mente como consecuencia del recorrido por cada una de las fases presentadas en los párrafos precedentes. Como se trata de un proceso de elevación de lo abstracto a lo concreto y, como lo dice el método dialéctico, se vuelve a la etapa (2), pero ya no tendría la característica de una representación caótica del sistema estructural pensado.
- (5) Aquí, las categorías que explican el modelo del sistema estructural planteado de manera ordenada (como síntesis) en la etapa anterior, se constituyen en categorías explicativas. Esto significa que, de la opción planteada, como

solución al problema de la realidad concreta (1), se estará en condiciones de explicar la misma.

(6) El proceso continúa, como una espiral, reuniendo las categorías explicativas del sistema o solución estructural planteada, como una totalidad más fina o más precisa, es decir, más abarcadora y que reúne la totalidad de los niveles anteriores.

(7) En el caso de la Ingeniería Estructural, cuya función fundamental es la concepción, diseño y construcción de estructuras, el proceso dialéctico finaliza con la construcción física o materialización del sistema estructural pensado, es decir, la transformación de lo abstracto pensado y concreto pensado en concreto sensible o sensorial. La estructura o sistema estructural finalmente construido físicamente se convierte en real y existente.

Cuanto más fino, rico, completo y abarcador sea el proceso, el sistema estructural pensado se aproximará más al construido, lo cual es un indicador de la calidad del proceso.

Al plantear esquemáticamente el método dialéctico aplicado al diseño de estructuras, no se ha variado ni la cantidad de etapas ni su cualidad, es decir, prácticamente se lo ha adecuado a la Ingeniería Estructural, sin embargo, al ser el considerado el método dialéctico como general, aplicable a cualquier ciencia y, considerando las particularidades de la Ingeniería Estructural y su objeto de estudio (las estructuras simples y sistemas estructurales complejos, desde su concepción y diseño hasta su construcción), es pertinente hacer algunas consideraciones, que podrían entenderse como modificaciones al método dialéctico para hacerlo más apropiado a nuestro objeto de investigación, la Ingeniería Estructural. Entre estas, se tienen:

- i. En la etapa (2), en la que se tiene una representación caótica del problema y sus posibles soluciones, el ingeniero de estructuras hace valoraciones globales y estimaciones "groseras", para tener órdenes de magnitud de los elementos que componen los posibles sistemas estructurales, uno de los cuales será la solución al problema. Esto es posible, entre otras cosas, por el conocimiento que tiene de la realidad observable (concreto real) descrito en la fase (1). En la mayoría de los casos, esta realidad observable no se la conoce con precisión, por ello, se ordenan estudios específicos que determinan la calidad del terreno, las condiciones naturales del entorno y sus variables más influyentes, las características de los futuros usuarios del sistema estructural, los materiales, etc.
- ii. En la etapa (3), el ingeniero estructural, hace un análisis detallado de cada una de las categorías estructurales mencionadas y realiza cálculos más detallados, de una o varias opciones como posibles soluciones al problema. En esta etapa, juega también su papel, el criterio, experiencia, habilidad e incluso las preferencias del ingeniero en cuanto a las posibles soluciones se refiere.
- iii. En la etapa (4) organiza y sintetiza, de manera coherente y completa la (s) posible (s) solución (es) al problema y, de éstas realiza presentaciones gráficas y numéricas (planos y memorias de cálculo), que le permitirán explicar en la etapa siguiente (5) cada uno de los elementos constituyentes (categorías) de estas soluciones.
- iv. Entre las etapas (4) y (5), en el caso de la Ingeniería Estructural, es pertinente plantear una etapa intermedia que básicamente consiste en la

construcción de modelos físicos, que representan la totalidad o algunos elementos del sistema estructural completo. El objetivo de estos modelos físicos, a escalas reducidas, es el de valorar las cualidades resistentes del sistema estructural pensado y estimar las propiedades resistentes de los materiales que conforman los elementos estructurales más relevantes.

- v. Como se trata de un proceso de aproximaciones sucesivas y en espiral, es decir, siempre se emprende retorno a una etapa anterior, pero a un nivel más elevado, al final (relativo), es decir, en la etapa (6) el ingeniero prepara toda la documentación necesaria para la ejecución material o construcción del proyecto, que es la etapa (7).

Por los argumentos expuestos y sobre todo por la versatilidad y generalidad del método dialéctico, planteamos el siguiente principio:

La concepción y el diseño de las estructuras es un proceso dialéctico complejo, de aproximaciones sucesivas, interactivo, de análisis y síntesis; esta interacción consiste en la relación permanente, dialéctica y dinámica entre lo concreto real (naturaleza), lo abstracto pensado (categorías, determinaciones, teorías, etc.) y lo concreto pensado. En esta relación, el objeto de estudio (las estructuras simples y sistemas estructurales complejos) se somete a "movimientos" continuos o cambios en ambos niveles, es decir, abstracción y concreción. En la medida que esta interacción y dinámica sean apropiadamente consideradas, el diseño del sistema estructural y su consecuente construcción o transformación en concreto real, tendrá el éxito esperado.

Principio 4: La Ingeniería Estructural; síntesis entre lo empírico y lo racional

Empírico y racional, son, evidentemente dos categorías dialécticamente opuestas y serán analizadas brevemente, antes de formular el principio correspondiente.

El empirismo es el nombre que recibe una doctrina filosófica, en particular gnoseológica, según la cual el conocimiento se halla fundado en la experiencia o, en otros términos, la validez de todo conocimiento radica en la experiencia.

Por otra parte, el racionalismo es la corriente del pensamiento que para la cual el único órgano adecuado o completo de conocimiento es la razón, de modo que todo conocimiento (verdadero) tiene origen racional; se habla en tal caso de racionalismo gnoseológico o epistemológico.

Con esas definiciones como premisas, nos preguntamos: ¿Es la Ingeniería Estructural racionalista o empirista?; ¿Son sus conocimientos adquiridos mediante la experiencia o por medio de la razón?.

Tratemos de responder a estas dos preguntas para luego situar a la Ingeniería Estructural en el sitio que corresponde.

Nadie, absolutamente nadie, que esté mínimamente vinculado directa o indirectamente a la construcción de estructuras, está en condiciones de negar que la ingeniería de Estructuras ha tenido, tiene y tendrá un sustento muy marcado, no solamente por los éxitos obtenidos, sino fundamentalmente por los fracasos o colapsos estructurales producidos en el planeta.

Asimismo, la historia de la Ingeniería Estructural establece que el desarrollo experimental ha sido y seguirá siendo un instrumento de validación muy importante de muchos de sus principios, leyes y ecuaciones.

Finalmente, la misma historia de la Ingeniería de Estructuras se refiere, en gran parte, a su desarrollo teórico y se destacan los pensadores, ingenieros y científicos

que han aportado a la evolución del pensamiento científico en esta rama de la ingeniería.

Estos argumentos son suficientes para formular el siguiente principio:

La ingeniería estructural representa una síntesis entre lo empírico y lo racional, puesto que se nutre de ambas corrientes del pensamiento científico. Las dos corrientes permiten, a la ingeniería estructural, la transformación de lo abstracto pensado y concreto pensado en concreto real.

Principio 5: Los códigos; equilibrio entre la teoría y la práctica

Evidentemente, la Ingeniería estructural y su protagonista principal, el ingeniero estructural tienen, como una de sus principales actividades, el diseño de estructuras y sistemas estructurales. El diseño estructural es un proceso mediante el cual el ingeniero piensa, concibe y crea estructuras, primero mentalmente, mediante el proceso de aproximaciones sucesivas planteado anteriormente y luego las materializa en la realidad como objetos físicos sensibles de una gran variedad de dimensiones, formas, y materiales.

En ese proceso de diseño intervienen tanto elementos teóricos (principios, teorías, métodos y leyes que rigen sus fenómenos) como aspectos de la práctica histórico-social concreta. Estos dos componentes evolucionan y cambian permanentemente.

Precisamente, para lograr un equilibrio entre la teoría y la práctica, entre lo deseable y lo posible, entre lo empírico y lo racional y para evitar diseños que caigan en extremos, nacen los códigos de diseño y construcción de estructuras.

Sin embargo, estos códigos son simplemente una guía fundamentada de ayuda para el ingeniero y no una receta que debe seguirse al "pie de la letra". Al respecto, con mucho fundamento, Lin¹² expresa, como dedicatoria en su libro *Diseño de Estructuras de Concreto Preesforzado*, lo siguiente: "*A los ingenieros quienes, más que seguir ciegamente los códigos de la práctica, tratan de aplicar las leyes de la naturaleza*". Esta dedicatoria refleja, indudablemente, una forma de pensar y actuar de los ingenieros con relación a los códigos.

Los códigos, en general, transmiten una filosofía de diseño de estructuras y establecen criterios y normas de dimensionado y cálculo recomendando cantidades o valores máximos y mínimos para no caer en diseños excesivamente seguros pero costosos desde el punto de vista económico y, por el contrario, diseños con altos riesgos de falla y baratos en cuanto a costos.

Asimismo, los códigos y normas permiten apreciar, a través del tiempo, la evolución y los cambios que se producen en las filosofías y criterios de diseño y cálculo de estructuras de diferentes materiales.

También se puede decir que los códigos se han desarrollado con la finalidad de proveer una manera simple, segura y económicamente eficiente para el diseño y cálculo de estructuras ordinarias sometidas a cargas en condiciones operacionales y ambientales normales. Los códigos facilitan el trabajo diario de los ingenieros de estructuras y permiten una normalización o estandarización en el diseño, en beneficio principalmente de la sociedad. Por esta razón, el desarrollo de un código es de mucha responsabilidad para los ingenieros e investigadores y esto se comprueba desde que las fallas en las estructuras son raras en condiciones normales.

En los campos del diseño y construcción de estructuras hay muchos códigos, normas y reglamentos que juegan ese papel, los mismos han sido redactados por

profesionales ingenieros con mucha experiencia sobre el tema, que representan a instituciones referentes a nivel internacional.

En el marco descrito en los párrafos que preceden, se plantea el siguiente principio, que sintetiza el papel de los códigos:

Los códigos y normas de diseño y construcción de estructuras representan filosofías de diseño, constituyen un equilibrio entre la teoría y la práctica y entre los extremos dialécticos de la ingeniería estructural, representan una síntesis fundamentada empírica y racionalmente, constituyen una verdad relativa aceptada por la comunidad ingenieril para unas condiciones socio-históricas concretas y son dinámicos desde el punto de vista dialéctico.

Principio 6: La calidad y la cantidad en las estructuras

Una de las leyes fundamentales de la dialéctica es la ley del paso de la cantidad a la cualidad y viceversa.

¿Hay fenómenos, criterios, principios o funciones de la Ingeniería Estructuras, que puedan interpretarse dialécticamente mediante la ley citada?.

La respuesta a esta pregunta es afirmativa y solo vamos a considerar los principios y ecuaciones que rigen el diseño (dimensionado) de las secciones transversales de los elementos estructurales que forman parte de los sistemas estructurales complejos.

En primer lugar, vamos a plantear dos definiciones, dentro de la Ingeniería Estructural, pero con matiz dialéctico; nos referimos precisamente a los términos o categorías cantidad y calidad.

Vamos a definir a la *calidad*, en el ámbito de la Ingeniería de Estructuras, como la resistencia de un elemento estructural, llámese columna, viga, etc.

Asimismo, definimos como *cantidad*, en la Ingeniería de Estructuras, las dimensiones de la sección transversal, que pueden ser expresadas en términos de su momento de inercia.

Recordemos las ecuaciones que permiten analizar y dimensionar las secciones transversales de elementos estructurales simples, sometidos a torsión, flexión y a compresión, respectivamente. Es suficiente inspeccionar el álgebra de estas ecuaciones para establecer con absoluta claridad la influencia de la cantidad (momento de inercia) en la calidad (resistencia) de cada uno de los elementos.

En todos los fenómenos, principios y ecuaciones de la Ingeniería Estructuras se detecta esta particularidad, es decir, la influencia de la cantidad en la cantidad y viceversa.

En consecuencia, considerando los casos explicados anteriormente y los muchísimos otros que pertenecen al campo de la Ingeniería Estructural, es posible formular, sin lugar a dudas, el siguiente principio, que generaliza el fenómeno interpretado dialécticamente:

En la Ingeniería Estructural, la cualidad (resistencia) y la cantidad (momento de inercia) se influyen recíprocamente.

Principio que no hace otra cosa que confirmar una de las leyes generales de la dialéctica, aplicada a la Ingeniería de estructuras.

Principio 7: Las matemáticas como instrumento de abstracción

En primer lugar, intentaremos definir el término abstracción, que, juntamente con la concreción son dos categorías de la dialéctica.

Abstraer significa literalmente *poner aparte, arrancar*. Es decir, lo abstraído es lo puesto aparte y el acto de poner aparte es una abstracción. Cuando el poner aparte es mental y no físico la abstracción es un modo de pensar mediante el cual separamos conceptualmente algo de algo.

Hoy nadie pone en duda la importancia de las matemáticas como instrumento y herramienta de casi todas las disciplinas científicas, en particular de las ciencias que componen la Ingeniería Estructural, en la cual los ingenieros usan y aplican las matemáticas para representar o modelar y hacer abstracciones o hipótesis de fenómenos físicos relativos al comportamiento de las estructuras mecánicas elementales y los sistemas estructurales complejos.

Prácticamente todos los fenómenos, principios y leyes que rigen el comportamiento de las estructuras se pueden representar mediante un modelo matemático, mismo que puede expresarse desde una ecuación algebraica simple hasta los más complejos sistemas de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales.

En todo caso, como la ingeniería estructural se refiere a fenómenos de la realidad objetiva concreta, asociada a la naturaleza, y, las matemáticas permiten la abstracción de esos fenómenos, no podemos esperar que la representación matemática de éstos sea exacta, es decir, jamás un modelo matemático va a predecir un fenómeno o variable de la ingeniería estructural de manera exacta, tal como ocurre en la realidad observable. Basta citar la famosa frase de Einstein que expresa: *"Las matemáticas, si se refieren a la realidad, no son exactas y, cuando son exactas, no se refieren a la realidad"*.

Qué claridad la sintetizada por el científico de todos los tiempos, que, en pocas palabras nos está diciendo muchas cosas. Cuando llevamos estas palabras al terreno de la Ingeniería Estructural, establecemos con absoluta nitidez que no hay modelo matemático perfecto, es decir, los fenómenos y variables de la ingeniería estructural pueden modelarse matemáticamente, pero, estos modelos representan una aproximación a la realidad objetiva observable y medible.

Solo a manera de ejemplos, mencionamos, a continuación, algunos modelos matemáticos que representan distintos fenómenos de la ingeniería estructural.

Para todos los ingenieros civiles, particularmente los ingenieros de estructuras, es familiar la ecuación general de la flexión pura, que es una ecuación algebraica sencilla que permite modelar el fenómeno y dimensionar secciones transversales de vigas sometidas a este tipo de esfuerzos. Esta ecuación se deriva o deduce matemáticamente haciendo una serie de hipótesis o abstracciones de la realidad, como las siguientes:

- El material de que está hecho el elemento estructural (viga) es homogéneo.
- El material se comporta de manera elástica lineal, es decir, es aplicable la ley de Hooke.
- Todas las secciones transversales de la viga permanecen planas y perpendiculares al eje longitudinal durante la deformación.

Así como hay fenómenos de la ingeniería estructurales que pueden ser representados mediante una ecuación sencilla como la mencionada, se tienen otros cuya modelación matemática es más compleja y se tiene que recurrir a las matemáticas más avanzadas como el cálculo diferencial y las ecuaciones diferenciales a derivadas parciales.

Así, el fenómeno de la deflexión (deformación por flexión) en vigas, puede ser modelado o representado matemáticamente mediante una ecuación diferencial ordinaria de primer grado y segundo orden.

Un ejemplo más complejo, desde el punto de vista matemático, constituye la ecuación diferencial de una placa delgada sometida a la flexión, cuya expresión matemática es una ecuación diferencial a derivadas parciales, de cuarto orden.

Evidentemente, para la deducción matemática de las ecuaciones mencionadas, se hacen hipótesis o abstracciones con respecto a la realidad, sin las cuales no fuese posible esta deducción.

En fin, hay muchísimos ejemplos más de cómo la Ingeniería estructural se sirve de las matemáticas para posibilitar la representación o modelación de sus propios fenómenos y, de esta manera, predecirlos con un muy buen grado de aproximación a la realidad observable.

Por ello, en función de los argumentos presentados en los párrafos que preceden, planteamos el siguiente principio:

Las matemáticas, en sus diferentes niveles, son uno de los instrumentos que utiliza el ingeniero de estructuras para la abstracción de sus propios fenómenos, leyes y principios asociados a la realidad objetiva.

Principio 8: Los modelos físicos; momento intermedio entre abstracción y concreción

Un modelo puede definirse como la simulación de una realidad determinada. Una clasificación de los modelos establece que éstos pueden ser *físicos*, que incluyen representaciones físicas del modelo o sistema considerado a escala reducida, tal como el modelo hidráulico de un río; *analógicos*, que son aquellos que usan otro sistema físico con propiedades similares a las del prototipo, por ejemplo, la analogía eléctrica que se utiliza para resolver problemas de flujo del agua a través de los suelos y, *modelos matemáticos*, en los cuales el comportamiento del sistema es representado por una ecuación o un conjunto de ecuaciones, expresando las relaciones entre sus variables y parámetros.

En el campo de la Ingeniería Estructural, en los últimos años ha aumentado considerablemente el uso de modelos. Hoy, el análisis de modelos físicos de estructuras es extraordinariamente importante, no solo como instrumento de investigación, sino que constituye, además, un suplemento importante de los métodos matemáticos utilizados en el análisis y proyecto de las mismas. Los modelos físicos utilizados en el análisis de los puentes colgantes es la aplicación más usual y conocida.

El análisis de modelos en los problemas estructurales, que se encuentran en la investigación o en el proyecto, se pueden utilizar por alguna de las tres razones siguientes:

- a. Porque el análisis matemático del problema en cuestión es difícil o virtualmente imposible;
- b. Porque, aunque sea posible, es tan tedioso y complicado que el análisis de modelos representa un método mucho más corto y ventajoso;
- c. Porque la importancia del problema es tal que justifica la comprobación y verificación de la solución matemática con ensayos de modelos.

Ya se ha argumentado sobre el papel de la experiencia en el diseño y construcción de estructuras. Particularmente, resulta útil e importante referirse a la etapa experimental, mediante la cual el ingeniero construye modelos físicos, a escala reducida, que simulan la realidad del futuro sistema estructural real. Entre estos modelos físicos, se tienen:

- Aquellos que simulan estructuras complejas y elementos de estas, sometidos a cargas especiales. En el mundo de la Ingeniería Estructural, han sido de mucha ayuda los experimentos mediante los cuales se estudia el comportamiento de las estructuras cuando les son aplicadas cargas similares a las que provocan los sismos. Es así que hoy por hoy se conciben, diseñan y construyen estructuras antisísmicas.
- En los laboratorios de hidráulica se estudia el comportamiento de las obras hidráulicas, especialmente aquellas que van a estar en contacto con las corrientes naturales de agua. Para ellos, también se construyen modelos físicos que simulan el comportamiento de este tipos de estructuras.
- En fin, los laboratorios más modestos cuentan con equipos que permiten probar la resistencia de una viga, una losa y otros elementos estructurales sometidos a diferentes tipos de esfuerzos.
- Los diagramas esfuerzo - deformación unitaria, que permiten la determinación de algunos parámetros mecánicos de los materiales, se construyen precisamente mediante modelos físicos, en los cuales se realizan una serie de mediciones como cargas aplicadas, deformaciones y otras.
- Asimismo, se preparan maquetas que permiten tener una visión global de "cómo se verá el proyecto una vez construido".
- Pero eso no es todo. También se preparan planos estructurales, que son representaciones gráficas en dos y tres dimensiones de cada uno de los elementos estructurales que forman parte de un proyecto. Estos planos permiten la construcción adecuada o materialización del proyecto.

Cuando se usa un modelo a escala reducida para estudiar una estructura real, es necesario que el modelo esté proyectado de modo que se pueda deducir el comportamiento del prototipo a escala natural del correspondiente al modelo. Para conseguirlo, las dimensiones del modelo y las características del material utilizado deben guardar ciertas proporciones con las dimensiones y material del prototipo. Los principios que rigen la relación entre un prototipo y su modelo se llaman *principios de semejanza*. Algunos de estos principios regulan el proyecto del modelo, en tanto que, otros establecen los medios para extrapolar los resultados del ensayo del modelo para predecir las cualidades del prototipo.

Lo expuesto anteriormente permite plantear, en términos dialécticos, el siguiente principio:

Los modelos físicos (maquetas, estructuras a escala reducida o de laboratorio y otros análogos), modelos gráficos (planos), memorias de cálculo, para citar algunos, constituyen elementos que simulan la realidad y forman parte de un momento intermedio en el proceso dialéctico de tránsito de lo abstracto pensado y concreto pensado a lo concreto real.

Principio 9: La estructura como sistema; el todo y las partes

Una de las características más relevantes del pensamiento científico contemporáneo es la incorporación, a la investigación, de "criterios sistémicos" y la utilización de una gran número de conceptos que pueden definirse genéricamente con el nombre de conceptos sistémicos. Estos conceptos permiten una visión multidimensional, multifacética e integral, bajo un carácter dinámico, de una realidad determinada o de un problema científico en particular.

La aparición de la teoría general de sistemas surge por la necesidad de explicar fenómenos o problemas científicos complejos.

Parece que todos están de acuerdo en que el punto de partida de toda “teoría de los sistemas” es una visión tal del objeto que se estudia como sistema que nos represente a este como una totalidad, o mejor dicho, como un objeto integral, lo cual significa que esta visión exige una diferenciación rigurosa entre el sistema y el medio que lo rodea, así como otra diferenciación no menos rigurosa, entre el sistema como un todo y los elementos, es decir, las unidades básicas que lo componen, cuyas particularidades, a su vez, se determinan y definen por cuestiones espaciales, temporales y por la función que cumplen en el marco de la totalidad. Estos elementos, de hecho, pueden estar constituidos por subsistemas con alto grado de complejidad interna y, por su forma de ser determinados y definidos, aleja toda posibilidad de considerar al sistema como una suma de agregados inconexos.

En calidad de rasgo determinante (que caracteriza específicamente a los objetos en esta teoría), la gran mayoría de los investigadores sitúan en un primer plano su integridad, que determina sus propiedades fundamentales y en un alto grado a todo el objeto en su totalidad y no sólo a sus elementos componentes por separado. Este rol “organizado” del todo, en relación con sus componentes que representan subsistemas, puede ser incluso muy fuerte. La simple división mecánica de los elementos en tales objetos sistémicos puede conducir a que el investigador obtenga un componente distinto de aquel que él quería investigar o transformar. De esta manera, se puede entender por integridad aquella modificación de cualquier elemento del sistema que influye sobre los demás elementos del mismo y conduce a la transformación de todo él; y a la inversa, la modificación de cualquier elemento depende de todos los demás elementos del sistema.

En consecuencia, el sistema constituye una unidad integral. El carácter sintético del mismo se explica mediante la totalidad. Así, cuando se define a éste como una totalidad, se quiere significar que no es solamente un conjunto, sino un conjunto de elementos interconectados que logran su integridad debido a esa interconexión. De este modo, el concepto de totalidad indica que el sistema es una unidad de dos aspectos: separación o pluralidad de elementos y la conexión o unidad de esos elementos que constituyen un todo mayor.

Una de las tareas más complicadas que se presenta en la investigación de los sistemas complejos consiste en definir (cualitativa o cuantitativamente) los elementos que lo componen y, en muchos casos, sus relaciones.

Lo importante en el concepto de elemento son sus propiedades y sus relaciones con los otros elementos, que lo caracterizan como parte integrante del todo.

Totalidad o todo y partes o elementos, son también dos términos dialécticos, ya que el todo está formado por las partes y no es necesariamente la suma de éstas.

En el caso de las estructuras de construcción, cada sistema estructural, por ejemplo, un puente, está compuesto de sus elementos (vigas, columnas, cimentaciones, losas, etc.) y, cada uno de estos cumple una función específica que, al integrarse, conforman el todo que tiene funciones y propiedades diferentes a cada uno de los elementos.

Consecuentemente, para un sistema estructural, como los que se ha tratado en esta investigación, planteamos el siguiente principio:

Cada elemento (partes) de un sistema estructural (todo) está conectado con los demás, sin embargo, cumple funciones específicas y no idénticas, que contribuyen a la estabilidad y resistencia del todo, que, además tiene propiedades globales diferentes a sus elementos integrantes.

Principio 10: La seguridad y el riesgo en la Ingeniería Estructural

En el campo de la Ingeniería Estructural es habitual usar términos como seguridad, riesgo de falla o riesgo de colapso y probabilidad de falla, además de otros inherentes precisamente a la seguridad de las estructuras.

Podríamos afirmar que seguridad y riesgo son términos dialécticamente opuestos. Así, cuando una estructura es segura, no está en riesgo y, cuando está en riesgo, no es segura.

Los fenómenos del riesgo de colapso de las estructuras y su seguridad, así como sus otros elementos inherentes siempre han sido preocupación de los ingenieros de estructuras con vistas a ofrecer un nivel de garantía razonable, que proteja tanto las inversiones realizadas (sistemas estructurales construidos) como las vidas humanas que usan estos sistemas.

La “ingeniería estructural forense” trata de los colapsos estructurales, para establecer sus causas, pero, la experiencia de los fracasos es también una fuente inestimable de mejora de conocimientos, con vistas a evitar fracasos futuros.

La seguridad en el cálculo, diseño y construcción de estructuras debe estar basada en los principios de previsión (seguridad), prevención de riesgos y acciones correctivas, además de las ya conocidas leyes de la mecánica estructural.

Sin embargo, aún cuando una estructura haya sido concebida y ejecutada con métodos y principios técnico – científicos, su capacidad resistente y, por lo tanto, su seguridad, tiene un riesgo inherente de colapso, el mismo que se puede cuantificar y se relaciona con el grado de protección deseado y su costo. Este riesgo, por consideraciones probabilistas, por mínimo que sea, nunca será nulo.

El riesgo de colapso estructural puede ser reducido a proporciones despreciables, pero, siempre estará potencialmente presente, ante fenómenos extraordinarios o ante circunstancias anormales o, en fin, ante los errores humanos.

Las causas de los colapsos estructurales pueden ser agrupadas, en una primera visión, en dos categorías principales: las acciones del medio ambiente y fenómenos naturales, por una parte, y, la acción humana, por otra.

Dentro la acción medioambiental (mecánica, química, biológica, etc.) y de los fenómenos naturales (vientos, lluvias, rayos, variación térmica, etc.) merecen destacarse dos conjuntos con particularidades propias: la acción de las masas de suelo y roca (deslizamientos o derrumbes, asientos, expansión, empujes, sismos, etc.) y el grupo de causas debida al agua (crecidas e inundaciones, saturación, etc.).

En lo que se refiere a la acción humana se engloban diversas causas como errores o concepciones equivocadas en el cálculo, defectos de diseño, construcción, ausencia de mantenimiento, acción bélica, sabotajes, etc.

En el contexto precedente, se formula el siguiente principio:

Al ser concebido, diseñado y construido por seres humanos, un sistema estructural no tiene seguridad absoluta y su riesgo de colapso está asociado al grado de protección deseado, a factores socioeconómicos y, al no ser determinista, se expresa en términos de probabilidad.

CONCLUSIONES

- La dialéctica es un cuerpo doctrinario de ideas de particular importancia en la interpretación de los fenómenos, funciones y principios fundamentales de la Ingeniería Estructural.

- Los diez principios dialécticos de la Ingeniería Estructural, formulados en este artículo, representan una de las muchas aplicaciones de la dialéctica a los diferentes campos del conocimiento.

REFERENCIAS

1. Rosental-Ludin (2013). *Diccionario Filosófico*. Ediciones Brontes, S.L., Barcelona.
2. Engels (1978). *Dialéctica de la naturaleza*. Akal, Madrid.
3. Hegel, G.W.F. (2012). *Fenomenología del espíritu*. Fondo de Cultura Económica, Buenos Aires.
4. Kohan, N. (2003). *El capital; historia y método*. Universidad popular Madres de la Plaza de Mayo, Buenos Aires.
5. Spirkin, A.G. (1969). *Materialismo dialéctico y lógica dialéctica*. Editorial Grijalbo, México.
6. Benítez, A. (2003). *Dialéctica de la Ingeniería Estructural*. Tesis de Doctorado en Ciencias (Ingeniería Estructural), Universidad Nacional Siglo XX-Convenio Andrés Bello-Instituto Internacional de Integración, La Paz.
7. Bunge, M. (2007). *Diccionario de filosofía*. Siglo veintiuno editores, México.
8. Gutierrez, R. (1996). *Introducción al método científico*. Esfinge, México.
9. Ferrater, J. (2004). *Diccionario de filosofía*. Editorial Ariel-Referencia, Barcelona.
10. Ambrose (1998). *Análisis y diseño de estructuras*. Limusa, México.
11. Vinnakota, S. (2006). *Estructuras de acero: comportamiento y LRFD*. McGraw Hill, México.
12. Lin, T.Y. (1965). *El cálculo de las estructuras de concreto preesforzado*. CECSA, México.