

DIALÉCTICA DE LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL CON REFERENCIA PARTICULAR A LA RESISTENCIA DE MATERIALES

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

Las leyes de la dialéctica, de Marx y Engels, permiten interpretar diferentes fenómenos de la naturaleza asociados con la ciencia y la tecnología. Se propone una dialéctica de la ingeniería estructural con referencia particular a la resistencia de materiales, ciencia fundamental para la ingeniería estructural.

El **problema**: ¿Cómo aplicar las leyes de la dialéctica de modo que permitan interpretar alternativamente el análisis y diseño estructural?

El **Objetivo**: “plantear una dialéctica de la ingeniería estructural”. Se aplica la misma al caso de la resistencia de materiales.

La **estrategia metodológica**, de tipo racional, consiste en:

- Caracterización de la resistencia de los materiales en el contexto de la ingeniería estructural.
- Breve revisión de las leyes de la dialéctica.
- Aplicación de las leyes de la dialéctica a la interpretación de problemas relacionados con el análisis y diseño estructural en el marco de la resistencia de materiales, que representa una aproximación a la dialéctica de la ingeniería estructural.

El **resultado** principal se refleja en la interpretación dialéctica del análisis y diseño estructural o “dialéctica de la ingeniería estructural”.

La **conclusión** fundamental radica en la posibilidad real de la aplicación de las leyes de la dialéctica a la ingeniería estructural y su implementación en el proceso enseñanza – aprendizaje.

DIALECTICS OF STRUCTURAL ENGINEERING WITH PARTICULAR REFERENCE TO RESISTANCE OF MATERIALS

ABSTRACT

The dialectic laws, from Marx and Engels, permit to interpret different nature phenomena associated with science and technology. It is proposed a dialectics of structural engineering with particular reference to resistance of materials as fundamental science for structural engineering.

*The **problem**: How to apply the laws of dialectic so that permit to interpret in a different way the structural analysis and design?*

*The **objective** of this paper is: to propose a dialectics of structural engineering with a particular application to the resistance of materials.*

*The rational **methodology** is applied, with the following stages:*

- Characterization of the resistance of materials in the structural engineering context.*
- A brief review of the dialectic laws.*
- Application of the dialectic laws to the interpretation of problems related to the structural analysis and design in the resistance of materials context, which represents an approximation of the dialectics of structural engineering.*

*The main **result** is expressed in terms of dialectic interpretation of structural analysis and design or “dialectics of structural engineering”.*

*The main **conclusion** is reflected in the real possibility of the application of the dialectic laws to the structural engineering and its possibilities of the use in the teaching – learning process.*

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 Ingeniería. La Ingeniería Estructural, una rama de la Ingeniería Civil, puede definirse, como una ciencia aplicada porque aplica fundamentalmente las leyes de la mecánica y las matemáticas; pero, al mismo tiempo es una tecnología porque utiliza el conocimiento científico, agregando nuevos conocimientos, para planear acciones de interés social utilizando criterios de optimización, es decir, máximo aprovechamiento y seguridad a costo mínimo^{1 y 2}. Estas acciones consisten en el estudio, diseño, análisis, cálculo, dirección y construcción de todo tipo de estructuras y sistemas estructurales tales como puentes, edificios, etc.

Casi todos los perfiles profesionales del ingeniero de estructuras, definidos en las instituciones de educación superior, le asignan a este profesional las funciones de planificar, analizar, diseñar, dirigir y construir estructuras, las cuales, compuestas por unidades elementales, forman sistemas estructurales más complejos como los mencionados en el párrafo precedente.

Existe un acuerdo generalizado que las actividades fundamentales del ingeniero civil, dedicado a las estructuras, son el análisis y diseño estructuras. Sin embargo, Norris y Wilbur³ consideran que el rol fundamental, al menos del ingeniero dedicado a los estudios y proyectos, es el de diseñar estructuras, las que, como paso previo, requieren el análisis.

En general, un plan de estudios de ingeniería civil contempla cuatro grupos de asignaturas, a saber: 1) las asignaturas que corresponden a las ciencias puras o básicas, es decir, física, matemáticas y química, 2) un grupo de ciencias aplicadas, que inician al estudiante en las funciones fundamentales del ingeniero, entre estas se tienen a la mecánica del medio continuo, estática aplicada, resistencia o mecánica de los materiales, hidráulica, mecánica de los suelos, teoría de la elasticidad, entre otras, 3) las llamadas asignaturas de especialidad entre las que se encuentran hormigón armado, estructuras metálicas y de madera, puentes, hormigón presforzado y estructuras hidráulicas, para citar algunas, y 4) las asignaturas denominadas complementarias como ingeniería económica, ingeniería legal, urbanismo, sistemas de ingeniería y otras; éstas últimas, como su nombre lo indica, complementan la formación del ingeniero civil. Esta estructura de asignaturas es una constante prácticamente en los planes de estudios de todas las universidades con diferencias principalmente de forma.

La resistencia de los materiales o mecánica de los materiales, una aplicación de la mecánica a la solución de problemas relacionados con el análisis y diseño de estructuras se contempla en los planes de estudio de todas las universidades, dentro de la formación del ingeniero de estructuras.

La particularidad de la resistencia de los materiales es que inicia la formación del estudiante en las principales actividades del ingeniero, ya mencionadas en los párrafos precedentes, es decir, el análisis y el diseño o dimensionado de estructuras. Consecuentemente, se podría afirmar que la resistencia de los materiales tributa directamente, tanto a otras asignaturas de análisis y diseño estructural como al perfil profesional del ingeniero civil en general y al ingeniero de estructuras en particular. Para justificar esta afirmación es suficiente recurrir a su definición: la resistencia de los materiales es una rama de la mecánica que estudia las relaciones entre las cargas externas 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 externas⁴. Esto quiere decir que sin un conocimiento profundo de la mecánica de los materiales es inconcebible la creación, el diseño y la construcción tanto de estructuras elementales como vigas, columnas, etc., como de sistemas estructurales complejos tales como puentes, edificios y otros. Es más, todos los autores de libros de resistencia de materiales introducen al estudiante a las funciones fundamentales del ingeniero civil, es decir, el análisis y el diseño de estructuras, comenzando siempre con las estructuras más elementales.

La incuestionable importancia del rol del ingeniero civil en la sociedad, provoca en los académicos una preocupación en torno a los problemas causados por el uso de la forma tradicional o clásica de la enseñanza de la ingeniería civil en general y la resistencia de materiales en particular, que se expresa en:

1. Clases teóricas, que consisten en una exposición, preferentemente oral, a cargo de un profesor llamado "titular" o "catedrático", con la colaboración de un jefe de trabajos prácticos en algunas universidades y un auxiliar de la docencia, habitualmente un estudiante destacado en la asignatura.
2. Realización de trabajos prácticos, que debieran desarrollarse de manera paralela a las clases teóricas pero que no siempre es así. Estos trabajos prácticos, en el caso de la mecánica estructural, consisten en cálculos y ejercicios variados relacionados con el análisis y el diseño o dimensionado estructural.

Ocasionalmente, dependiendo del profesor, se programan salidas al terreno, visitas a obras y otras actividades para complementar el proceso de aula.

La enseñanza tradicional de la resistencia de los materiales, de las disciplinas que la usan y otras afines no toma en cuenta los siguientes elementos que el autor los considera fundamentales e incorpora como uno de los factores para mejorar la didáctica de la mecánica de materiales.

Debe reconocerse que una estructura de ingeniería civil en general y de la resistencia de los materiales en particular, si bien como producto terminado es un objeto físico, no lo ha sido así siempre, es decir, ha pasado por un complejo proceso que abarca desde su concepción hasta su materialización final. Se considera que, los diferentes momentos por los que transita una estructura podrían sintetizarse en:

1. El modelo teórico; que consiste en la expresión teórica de un fenómeno relacionado con la resistencia de los materiales. En la teoría de la resistencia de los materiales y disciplinas afines hay muchos fenómenos físicos que pueden expresarse desde el punto de vista teórico, por ejemplo, matemáticamente (modelos matemáticos).
2. El modelo físico; que habitualmente consiste en una estructura elemental a escala reducida de un determinado material con el objeto de ser probada en laboratorio y de este modo determinar algunas de sus propiedades mecánicas a ser usadas posteriormente. Aquí, no debe confundirse este modelo con la maqueta arquitectónica, que también es un modelo físico pero con características y objetivos diferentes.
3. La estructura real; que es la estructura materializada o construida, en un determinado espacio y con características particulares de acuerdo a los requerimientos de la sociedad.

La enseñanza “clásica” de la resistencia de los materiales y disciplinas afines, si bien utiliza los citados elementos, no lo hace de manera integrada, dialéctica y sistémica, pues no se consideran:

- Las transformaciones y contradicciones que sufren los elementos estructurales, desde su construcción como modelos teóricos hasta su construcción como objeto real.
- La interacción dialéctica que tiene lugar entre los diferentes momentos citados, la misma que podría ser un elemento orientador para la construcción del conocimiento por parte del estudiante, con la ayuda del profesor.

Es fundamental aceptar que en la forma clásica de la enseñanza de la mecánica de materiales hay un desconocimiento de los procesos cognitivos y pedagógicos que deben tener lugar para que haya una adecuada asimilación y posterior elaboración de los objetos reales y no se crean las condiciones de aprendizaje necesarias que permitan transformaciones necesarias.

Los aspectos señalados en los párrafos precedentes, dada la experiencia del autor, impiden, entre otras cosas:

- La asimilación integral de los principios de la asignatura por parte del estudiante.
- La construcción apropiada de su propio conocimiento de manera dialéctica y sistémica, considerando los citados elementos.
- La formación de habilidades que enfoquen la estructura considerando las particularidades citadas.

Ante la situación descrita en los párrafos precedentes, se pretende aplicar las leyes de la dialéctica a la interpretación de algunos fenómenos relacionados con el análisis

y diseño de estructuras, por ello, se sintetiza el **problema** mediante la siguiente pregunta:

¿Cómo aplicar las leyes de la dialéctica de modo que permitan interpretar de otra manera el análisis y diseño estructural?

En consecuencia, el **Objetivo** fundamental de este trabajo consiste en “plantear el esbozo de una dialéctica de la ingeniería estructural”, con referencia particular al caso de la resistencia de materiales.

UNA BREVE MIRADA A LA “DIALÉCTICA”

Referirse a la “dialéctica” y a las diversas acepciones que ha ido adquiriendo este término a lo largo de la historia, obliga a remontarnos, en primer lugar a los grandes pensadores griegos como Sócrates, Platón y Aristóteles, en primer lugar, para pasar, luego, por Kant, Hegel, Marx, Engels y muchos otros.

El estudio profundo de la filosofía dialéctica y la dialéctica como método y como lógica, si bien puede ser una tarea grata, al mismo tiempo imaginamos que es muy ardua y puede durar mucho tiempo. Con seguridad, también, que adoptar una posición, con relación a los diferentes pensadores sobre este tema, debe ser también una labor complicada.

Por las razones mencionadas en los párrafos precedentes y a modo de aclaración o advertencia, dado el carácter y alcance de este artículo, se desea manifestar lo siguiente:

- Si bien el presente trabajo se basa en la dialéctica tal como fue concebida por Hegel, Marx y Engels, no interesan, para el objetivo propuesto, las diversas opiniones que se tienen sobre el tema. Es decir, se hará abstracción sobre la opinión tanto de los partidarios como de los adversarios de ellos.
- Por otra parte, nos limitaremos a sintetizar (hecho que ya representa una tarea complicada) aquellos aspectos de la dialéctica que, desde nuestro punto de vista han de ser útiles para interpretar, de una manera alternativa, algunos elementos de la resistencia de los materiales.
- Se sabe que varios de los elementos de la dialéctica de Hegel, Marx y Engels han sido duramente cuestionados. Por lo tanto, para el objetivo del presente trabajo, solamente mencionaremos aquellos aspectos que se consideren útiles en el marco de lo expresado en el párrafo que precede.

En consecuencia, con las advertencias mencionadas anteriormente, a continuación se presenta una síntesis de los conceptos y elementos fundamentales de la dialéctica^{5 y 6}.

- **Etimología.-** El concepto de “dialéctica” hace referencia a dos términos griegos: dia (de lo uno a lo otro) y legein (decir, razonar, determinar, definir). En consecuencia, su sentido más ordinario equivaldría al “arte del diálogo” donde se produciría una contraposición entre dos o más lógoi (razones).
- **Sócrates, Platón y Aristóteles.-** Ha sido Sócrates (470-399 a.c.) el que ha hecho clásico en Filosofía el diálogo entre dos personas como medio de alcanzar un término de verdad, en tanto que, Platón (427-347 a.c.) ha llevado el arte del diálogo filosófico para alcanzar la verdad a su perfección suprema. Los diálogos y la dialéctica en Platón son un método discursivo para subir desde el conocimiento del mundo de lo sensible al mundo de las ideas y ya en éste, de una idea en otra hasta el conocimiento y el amor a la “Idea del Bien”. En Aristóteles (384-322 a.c.), el término dialéctica tiene un sentido un tanto peyorativo, mientras que la

analítica es el estudio de la demostración, es decir, del silogismo que desde premisas verdaderas y necesarias engendra la ciencia cierta; la dialéctica es el estudio de los razonamientos que no son más que probables porque están fundados sobre simples opiniones.

- **La edad media.**- En esta época se llamaba dialéctica a la lógica formal, o sea a la ciencia del discurso puro. Frecuentemente el discurso procedía, en cuestiones y disputas, por la confrontación del sí y el no que impulsaba el pensamiento hacia la verdad.
- **Kant (1724-1804).**- Resucita el término dialéctica y le da otra vez un sentido peyorativo. Llama dialéctica a la tercera parte de la *Crítica de la razón pura*, en la que estudia los razonamientos metafísicos que -según él- sólo aparentemente son válidos. La dialéctica trascendental es la ilusión de conocer las cosas en sí por razón pura. Pero con el estudio de las antinomias metafísicas que allí hace, con el de las categorías que hizo en la *analítica trascendental*, en las que la tercera de cada grupo siempre es la síntesis de las dos anteriores y con el de la unidad trascendental en la que todas las categorías se sintetizan, pone las bases sobre las que Hegel consagra, en la Filosofía contemporánea, el término dialéctica.
- **Hegel (1770-1831).**- La dialéctica vuelve a recuperar su sentido “fuerte” con Hegel que, en deuda con Heráclito (544-484 a.c.) y Spinoza (1632-1677), concibe la realidad dinámicamente como una oposición de contrarios.

La intuición fundamental de la que parte Hegel en la construcción de su sistema es ésta: En todas las civilizaciones, en todas las religiones, en todas las filosofías, el hombre encuentra la realidad como separada de sí mismo. Se encuentra como extraño a las cosas, como hostil a ellas. Por ello experimenta un sentimiento de desunión, de alejamiento. El gran problema para Hegel es encontrar un medio de reconciliación del hombre con las cosas, con los otros hombres, consigo mismo. Su filosofía es una filosofía de reconciliación universal. Si él mediante ella logra esa reconciliación, habrá alcanzado la plenitud humana y la verdadera libertad. Para lograrlo busca aquel último fondo de los seres en el que todo es uno y lo encuentra en la Idea. De otra manera, con sus mismas palabras, se encuentra con que, en el fondo, “*todo lo que es racional es real y todo lo que es real es racional*”. Si la última realidad es esencialmente racional, podemos llamarla Idea. Como por otra parte ese fondo último o absoluto es “sujeto”, es decir, no es una sustancia, un ser acabado, sino un movimiento, un proceso en vías de generación del universo, tenemos que la última realidad inmanente en la Naturaleza y en el Espíritu, en la que ambos comulgan, es una Idea absoluta en movimiento y proceso de desarrollo. Decir que es Idea, es tanto como decir que es Razón y que, el proceso de generación del universo es lógico. Por ello, las leyes que regulan el proceso de los conceptos lógicos son las mismas leyes que regulan el movimiento evolutivo de la Naturaleza y el Espíritu. Todo concepto es realidad y toda realidad es concepto. En la naturaleza, lo racional existe, aunque sin llegar a ser consciente de sí mismo; en el hombre alcanza esa conciencia de sí y se hace Espíritu. El alma, la conciencia, la razón (espíritu subjetivo), la familia, la sociedad, el Estado (Espíritu objetivo), el arte, la religión, la filosofía (Espíritu absoluto), son estadios cada vez más perfectos del Espíritu porque ellos tienen una conciencia cada vez más perfecta de sí mismo y alcanza una reconciliación más perfecta con la realidad. Queda claro, entonces que para Hegel toda la realidad –llámese pensamiento puro, llámese naturaleza

física, química o biológica, llámese animal, hombre, historia, sociedad, política, derecho, arte, religión o filosofía- siempre procede y se desarrolla conforme a un movimiento racional y lógico porque en su fondo “todo lo real es racional”. La expresión “todo lo racional es real” significa que es suficiente pensar con rectitud lógica para estar cierto a priori de que lo pensado coincide con la realidad, ya que pensamiento y realidad son aspectos de un mismo y único fondo ideal. Estos principios son las bases y puntos de arranque de la filosofía hegeliana.

Pero, ¿cuál es el método?, ¿en que consiste o cómo es el movimiento racional por el que la Idea se desarrolla?. Para Hegel, el encadenamiento lógico entre los momentos de la realidad -que también llama esencias- consiste en una disposición ternaria tal que dos esencias contrarias se atraen o se implican necesariamente la una a la otra, y de ello resulta la existencia de una tercera, que contiene de modo superior y eminente, la perfección de las dos primeras, después de haberlas superado. Luego, el proceso vuelve a comenzar para esta tercera esencia que implica también otra esencia contraria suya, forma de ambas otra superior y así sucesivamente. Es lo que Hegel llama movimiento “dialéctico” o “especulativo”. Los dos primeros momentos o esencias se corresponden con dos conceptos -equivalentemente dos realidades- frente a frente: **tesis y antítesis**. Pero, ambos se necesitan porque se complementan y por eso se reclaman y se exigen mutuamente, tienden a fundirse y reconciliarse y, al hacerlo, resulta un nuevo concepto -una nueva realidad- que comprende los conceptos -las realidades- anteriores en un tercer término, más rico que los dos anteriores. Es la **síntesis**. Esta a su vez se hará tesis, porque a ella, por ser también limitada, se le opondrá una negación o antítesis; de ambas surgirá una nueva síntesis y así sucesivamente. Se puede decir que la tríada tesis-antítesis-síntesis significa una acción que es suprimir-conservar-elevar, de forma que el término resultante de la acción es más rico que los anteriores y los conserva elevados después de negarlos. Así pues, nada se pierde; todo se conserva y se sublima. La dialéctica de Hegel es, sin duda, el intento más grandioso que se ha hecho nunca de extender el principio de conservación de la energía a todos los campos de la realidad.

- **Marx (1818-1883) y Engels (1820-1895).**- Invirtiendo la postura de Hegel, Marx construye una dialéctica en torno a la materia (no a la idea), cuya finalidad no es la simple teorización y justificación de la realidad, sino su transformación revolucionaria. Así como Marx había buscado las leyes que explican la historia humana (materialismo histórico), Engels busca las leyes generales que dan inteligibilidad a las ciencias de la naturaleza (materialismo dialéctico). Para Engels no basta concebir la dialéctica, como se hace a veces, diciendo que consiste en la tríada: tesis-antítesis-síntesis. La dialéctica se fundamenta en tres leyes, elaboradas por Engels en su materialismo dialéctico y que pueden enunciarse de la siguiente manera:

1. Ley del paso de la cantidad a la cualidad y viceversa

En la naturaleza y de un modo claramente establecido para cada caso singular, los cambios cualitativos sólo pueden producirse mediante la adición o sustracción cuantitativas de materia o de movimiento. Es decir, una adición o una sustracción cuantitativa y continua de elementos a una realidad dada, llega a un determinado umbral; si por una nueva adición o sustracción cuantitativa se pasa esa frontera, se produce otro cuerpo con propiedades cualitativas distintas del anterior.

2. Ley de la penetración de los contrarios o ley de la unidad o lucha de opuestos o ley de los contrarios

Tres principales sentidos, distintos y complementarios, se han hallado en Hegel del término “contradicción”; el distinguirlos adecuadamente ayuda a comprender a Hegel y, por consiguiente a Marx y Engels:

- En primer lugar, la expresión hegeliana “toda cosa en si misma es contradictoria” significa que toda cosa exige la existencia de su contrario, entendida esta palabra únicamente como algo que relacionado con ella, pero no es ella. Es evidente que toda cosa (todo concepto), limitado, por el hecho de serlo, nos está remitiendo a otra cosa que no es ella, que en ese sentido la “niega”, es su limitación, su negación, su contrario. Aquí el sentido de la palabra contradicción se amplía y se puede considerar que nos habla de desunión de lo que si estuviera unido significaría una plenitud superior, de lo que por lo mismo tiende a una reconciliación. Mientras ésta no se verifica, se da una alienación en cada uno de los dos términos, en el doble sentido de desposesión y alejamiento de uno con respecto al otro. El momento de superación será la aparición de un tercer término en que estos contrarios se reconcilian y sintetizan.
- Un segundo sentido de la palabra “contradicción” viene a completar el primero. Ese término “contradicción”. Hegel no se conforma con ver las cosas separadas, las ve enfrentadas en oposición y en lucha la una con la otra. La separación se hace hostilidad. La alienación tiene ahora sentido peyorativo. La negación mutua de los términos es activa y agresiva, aunque esta hostilidad no es sino un momento previo que se completa con el de la resolución final, en la que los contrarios se identifican. La razón de esta pugna estaría en que cada cosa tiende al infinito y es obstaculizada por su contraria.
- El tercer sentido de “contradicción” es más general y designa el hecho de que una cosa es esencialmente, por su ser y en su ser mismo, relativa a otra cosa sin la cual la primera carece de sentido. “Contradicción” sería así la relación constitutiva recíproca entre dos términos. Ninguna cosa es nada si se la ve aislada de las demás, “abstraída” del conjunto. Sólo en su relación con las otras alcanza significación, o, mejor aún, cada cosa queda constituida por su relación con las demás. Por eso, en la síntesis como tal, cuando se “resuelve” o “supera” la “contradicción” es donde la relación se verifica con más profundidad. La síntesis sería así no solo la unión de los contrarios sino la unión de identidad y de “contradicción”. O mejor el encuentro del fundamento en la relación misma. Así pues, la expresión hegeliana “toda cosa en si misma es contradictoria”, significa de manera general que toda cosa (todo concepto) está limitada-negada-alienada-hostigada-relacionada con otra y que esta limitación-negación-alienación-hostilidad-relación tiende a superarse en un tercer término en el que las dos se subliman y sintetizan. Luego vuelve a comenzar el proceso.

3. Ley de la negación de la negación

Cuando Hegel habla de los tres momentos de la dialéctica usa raras veces los términos tesis-antítesis-síntesis. Utiliza con mucha más frecuencia los más expresivos de afirmación, negación y negación de la negación. Engels dice, refiriéndose a Legal, que la negación de la negación “figura como la ley fundamental que preside la estructura de todo el sistema”. En realidad es Engels,

no Hegel, el que enuncia este mecanismo como una ley. Pero sí es cierto que ella explica e ilumina bien el mecanismo de la dialéctica, al menos en una de sus formas más importantes, en la forma más dinámica e histórica de la dialéctica. Por sí mismo es claro que, en la forma más dinámica de la dialéctica, la antítesis es la negación de la tesis y la síntesis es la negación de la antítesis, es decir, negación de la negación. Es claro también que en la dialéctica hegeliana, el resultado final, la negación de la negación o síntesis, no es la tesis inicial, sino un término superior y más perfecto que los dos anteriores. Esta formulación es típicamente especulativa, es decir, una interpretación ideal, categorial de la realidad concreta.

En el marco de los elementos de la dialéctica sintetizados en los párrafos precedentes y que corresponden fundamentalmente a Hegel, Marx y Engels, podemos expresar lo siguiente:

- Un elemento importante, que puede ser de utilidad para nuestros objetivos, es el hecho de que Marx asume de Hegel que la realidad no es estática, sino dinámica y cambiante.
- En consecuencia, la noción más general de movimiento debe entenderse como cambio. Es decir, no todo movimiento es puramente mecánico; hay otras formas de movimiento no reductibles al movimiento mecánico.
- Como el pensamiento, para Engels, es un reflejo de la realidad y la realidad es dinámica (cambiante), también el pensamiento es móvil, dinámico y dialéctico.
- Hegel formula las citadas leyes como estructuras del pensamiento ideal. Marx y Engels creen encontrarlas en las realidades materiales.
- Parece que, el significado de contradicción, es el que ha quedado más subrayado en las concepciones filosóficas de la dialéctica. Son las contradicciones el motor de cambio y transformación expresados en los párrafos anteriores.
- La unidad de la teoría con la práctica, que enfatiza el marxismo, es un aspecto fundamental a tener en cuenta, considerando las transformaciones, la dinámica y la dialéctica de las estructuras mecánicas desde que son concebidas mentalmente (teoría) hasta que se materializan en la realidad (práctica).
- El método dialéctico que se resume en la tríada tesis-antítesis-síntesis es el que, en algunos casos, podría permitir explicar e interpretar, de una manera alternativa, varios aspectos relativos al comportamiento, transformaciones (movimiento) y contradicciones de las estructuras de la resistencia de los materiales.
- Lo mismo puede decirse de las tres leyes de la dialéctica formuladas por Engels, es decir, estas permitirían, igualmente, interpretar el "movimiento" de las citadas estructuras, tanto conceptualmente como en la realidad.
- Evidentemente, especialmente Engels, ha dedicado una parte importante de su tiempo a reunir una gran cantidad de ejemplos conducentes a la confirmación empírica de las tres leyes fundamentales de la dialéctica formuladas por él. Si bien estos ejemplos se escogieron de ciencias diferentes a la resistencia de los materiales, los mismos pueden servir como una guía para intentar construir una *dialéctica de la mecánica de los materiales*.
- Existen muchas otras categorías que matizan y perfilan las nociones de Marx y Engels de materia y movimiento. Entre estas categorías se tienen: identidad y diferencia, necesidad y contingencia, causa y efecto, apariencia y esencia, etc. Estas categorías serán referidas específicamente, en su momento, si acaso es necesaria alguna de ellas.

La dialéctica de la resistencia de los materiales que, se presenta más adelante con ejemplos muy específicos, ha sido esquematizada sobre la base del materialismo dialéctico de Marx y Engels, particularmente considerando el carácter dinámico de la realidad y los conceptos, las tres leyes de la dialéctica y la tríada tesis – antítesis – síntesis.

RESULTADOS

La resistencia de los materiales, tal como ha sido definida anteriormente tiene, como uno de sus principios fundamentales, el concepto de esfuerzo y la ley de la elasticidad de Hooke. Es decir, para estudiar y aplicar adecuadamente esta ciencia, no se puede prescindir de estos dos elementos, además de las leyes de la mecánica. Es más, en términos de las funciones principales del ingeniero que se comienzan a usar en la citada ciencia y que son el análisis y diseño de estructuras, el concepto de esfuerzo y la ley de Hooke están presentes en todo momento.

Consecuentemente, no se puede hablar de una dialéctica de la resistencia de los materiales sin hacer referencia a los citados principios.

En el contexto mencionado, se comienza la construcción de dialéctica de la resistencia de los materiales con el análisis dialéctico del diagrama esfuerzo – deformación unitaria, que es la representación gráfica de los esfuerzos y deformaciones que sufren las estructuras. Este diagrama, que permite estudiar adecuadamente la ley de Hooke, es la base fundamental para el análisis y diseño de las mismas.

El concepto de esfuerzo comienza a estudiarse, en términos dialécticos, con el esfuerzo de flexión, que es uno de los fenómenos elegidos para ejemplificar el uso de la dialéctica.

Se muestra, también, que las leyes de la dialéctica se aplican a cualquier otro tipo de esfuerzo, tal como ocurre, por ejemplo, con una estructura sometida a una combinación de esfuerzos (flexión más compresión).

Finalmente, la dinámica o transformaciones que sufre una estructura, desde su concepción teórica hasta su materialización como objeto real, se presenta, en términos dialécticos, haciendo uso de un concepto que está presente en toda la asignatura y otras del área de la ingeniería estructural, se trata del concepto de centro de gravedad.

Por todos aspectos citados en los párrafos precedentes, que son inseparables y, además, fundamentales en la resistencia de los materiales, consideramos que la propuesta que sigue se constituye en el inicio de la construcción de una dialéctica de la resistencia de los materiales.

DIALÉCTICA DE LA MECÁNICA DE LOS MATERIALES

Es un hecho incuestionable que, hoy por hoy, las ciencias tienden a especializarse sobre la base de sus leyes y principios particulares y, entonces, se produce una separación, un alejamiento, una ruptura entre la ciencia específica y la filosofía. En este marco, tratando de lograr un acercamiento, una reconciliación, la unidad, entre ciencia (resistencia de los materiales) y filosofía, se esboza, la construcción de una “dialéctica de la resistencia de los materiales”, ciencia aplicada de una importancia capital en la formación del ingeniero de estructuras.

Tomando en cuenta que la mecánica es una parte de la física (ciencia natural), que Engels ha tomado muchos ejemplos de la naturaleza para confirmar sus leyes de la dialéctica y que la resistencia de los materiales es una aplicación de la mecánica a la solución de problemas relacionados con el análisis y diseño de estructuras compuestas de diferentes materiales, se infiere, en consecuencia, que es posible construir una *dialéctica de la resistencia de los materiales*.

Dialéctica en el diagrama esfuerzo – deformación unitaria.-

A partir del siglo XVIII la mecánica de los materiales 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 aparatos⁷. Es, a partir de entonces, que se comienza a profundizar en el concepto de esfuerzo y deformación y, por lo tanto, en la construcción del llamado “diagrama esfuerzo (σ) – deformación unitaria (ϵ)”. Este diagrama permite estudiar el comportamiento de un determinado material, sometido a un tipo de esfuerzo e incrementando el mismo, hasta que colapsa o falla, o, dicho en términos más simples, hasta que se produce la ruptura. El mismo diagrama permite a los ingenieros estudiar el comportamiento elástico de los materiales según la ley de Hooke que establece que: “los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones”. La figura 1 muestra el diagrama esfuerzo – deformación unitaria, típico de una barra de acero sometida a un esfuerzo de tracción.

En este diagrama se pueden identificar, claramente las siguientes regiones o fases:

- Región elástica (OA); en la cual, el material se comporta elásticamente, es decir, sigue la ley de Hooke. Como puede apreciarse, esta fase está identificada con una relación lineal, una línea recta que parte del origen del sistema de coordenadas. El punto final de esta línea recta se denomina límite de proporcionalidad. Si se incrementa ligeramente el esfuerzo, el material comienza a comportarse “no elásticamente” e, inmediatamente después del límite de proporcionalidad se tiene el llamado límite elástico.
- Comienza, entonces, región de “fluencia” (AB) con el llamado esfuerzo de fluencia. En esta región, se puede percibir claramente que, a pesar de que el esfuerzo no aumenta, el material se sigue deformando (fluye). El material ya no se comporta elásticamente, sino, tiene un comportamiento plástico.
- Si se aumenta el esfuerzo, el material va a seguir comportándose plásticamente hasta que alcanza el esfuerzo máximo y finalmente se fractura o rompe (esfuerzo de rotura), es la región BC.

Sobre las bases de este diagrama, consecuencia de una prueba de laboratorio, el ingeniero selecciona las dimensiones (dimensiona o diseña) un elemento sometido a un esfuerzo de tracción.

Imagínese un elemento (barra), sometido a una determinada fuerza de tracción y que pertenece a un sistema estructural más complejo, por ejemplo un reticulado. Intentemos interpretar dialécticamente los principios que regulan el proceso de diseño.

- Si se seleccionan las dimensiones de la sección transversal del citado elemento de modo que se produzcan esfuerzos muy pequeños (en la región elástica, cerca del origen de coordenadas), no se estará aprovechando adecuadamente la resistencia del material, aunque las dimensiones ofrezcan seguridad.

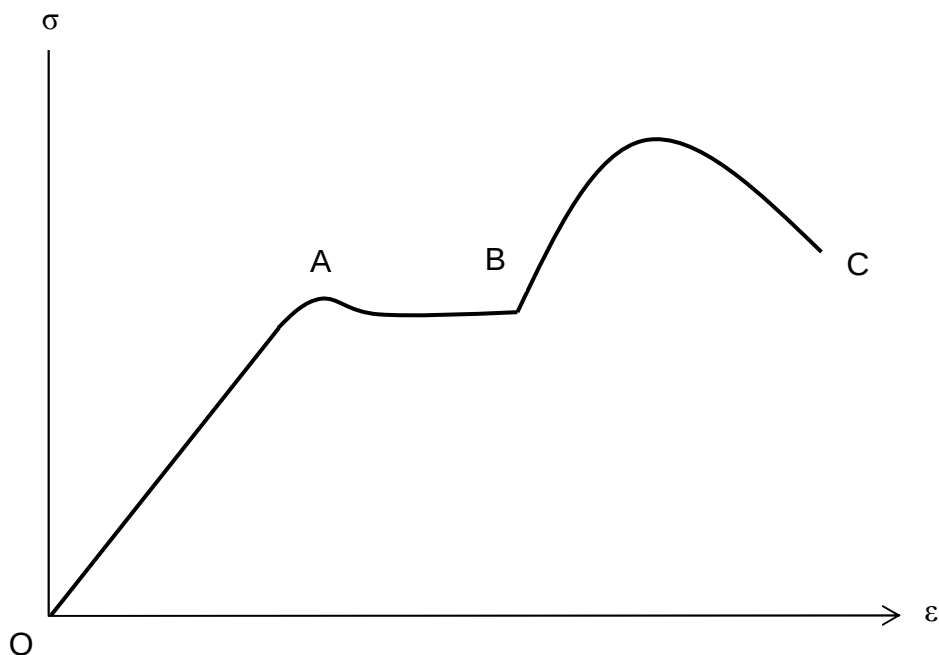


Figura 1: diagrama esfuerzo-deformación unitaria, típico

- Por el contrario, si las dimensiones del elemento son seleccionadas de manera que se produzcan esfuerzos muy grandes, por ejemplo en la región de fluencia o más allá de ella, existe el riesgo de que con pequeños incrementos de carga o esfuerzo, el elemento llegue a la ruptura.
- Por lo dicho en los dos párrafos precedentes, el ingeniero ha creado los llamados factores de seguridad, que permiten dimensionar o diseñar los elementos estructurales bajo el concepto de esfuerzos admisibles. Todo esto, en términos de la dialéctica, se puede interpretar de la siguiente manera:

Tesis: Diseño seguro (no se aprovecha adecuadamente la resistencia del material).

Antítesis: Diseño inseguro (se aprovecha la resistencia del material).

Síntesis: Diseño bajo el concepto de esfuerzos admisibles. Es un diseño seguro que aprovecha “racionalmente” la resistencia del material.

Expresado de otro modo, también dialécticamente, no se podría hablar de un diseño seguro si no habría (en la mente del ingeniero y en la realidad) un diseño inseguro. Es decir, los dos términos son opuestos, contrarios, pero, se necesitan el uno al otro y, en consecuencia, aparece un tercer término o concepto que “funde” a los dos primeros, que los reconcilia y que es superior a los mismos.

Generalizando la idea anterior en términos de “economía del diseño” y para todos los tipos de esfuerzos:

En las estructuras de la ingeniería civil en general y en las de la resistencia de materiales en particular, el concepto de esfuerzo es un elemento muy importante. Se tienen esfuerzos axiales (tracción y compresión), esfuerzos de flexión, esfuerzos de corte y esfuerzos combinados. En todos estos tipos de esfuerzos, La ley de Hooke juega un rol protagónico. Para todos estos tipos de esfuerzos, en la resistencia de los materiales, así como en otras ciencias de la ingeniería civil, al estudiante se le

plantean, normalmente, dos tipos de problemas, asociados con las actividades profesionales principales del ingeniero civil:

- Diseño o dimensionado de los elementos estructurales: para una solicitación o carga (o combinación de cargas) determinada previamente y que provoca un tipo de esfuerzo, se determinan las dimensiones más apropiadas para que el elemento sea capaz de resistir dicha carga
- Análisis del elemento: conocidas las dimensiones, se determina la máxima carga que puede soportar dicho elemento para un tipo de esfuerzo.

Interpretemos dialécticamente el primero de los problemas citados, pero, esta vez, empleando los conceptos de economía y seguridad simultáneamente:

- Un diseño muy seguro (que no aproveche racionalmente la resistencia del material), es decir, muy conservador, es, normalmente muy caro, es decir, antieconómico (tesis).
- Por otra parte, un diseño “no conservador”, que aproveche totalmente la resistencia del material, si bien es mucho más económico, puede poner en riesgo la estructura (antítesis).
- En consecuencia, el equilibrio entre las dos posiciones (la síntesis), es lo que se llamaría el “diseño óptimo”, que es seguro, pero que, a la vez, es económico. En suma:

Tesis: Diseño seguro y antieconómico.

Antítesis: Diseño inseguro y económico.

Síntesis: Diseño óptimo (seguro y económico).

Aquí, también, no podríamos referirnos al término seguridad (sinónimo de costoso) si no existiese la inseguridad (sinónimo de económico). Es decir, los términos seguridad-costoso e inseguridad-económico son opuestos pero se reclaman, se necesitan y forman, juntos, el término o concepto de “diseño óptimo” que es, a la vez, seguro y económico.

Es fácil probar que la tríada tesis-antítesis-síntesis, así planteada, es generalizable a todos los tipos de esfuerzos que se presentan en la mecánica de los materiales, pues, en todos los casos, la filosofía y principios de diseño son los similares.

Análogamente al caso de los esfuerzos, se puede plantear la tríada de la dialéctica para las deformaciones, las cuales siempre se verifican cuando se diseña un elemento estructural:

- **Tesis:** deformación nula (ideal).
- **Antítesis:** deformación excesiva (no nula, real).
- **Síntesis:** deformación admisible.

El diseño de los elementos estructurales concebido en términos de la primera ley de la dialéctica: paso de la cantidad a la cualidad y viceversa.-

Consideremos, ahora, un elemento estructural sometido a un tipo especial de esfuerzo, la flexión pura. Este elemento se conoce en la mecánica de los materiales como viga. Situémonos, además, en el problema de diseño o cálculo de las dimensiones de la sección transversal del citado elemento, que está sometido a un tipo de carga.

La selección de las dimensiones tiene como base a la ecuación de la flexión pura, que se encuentra en todos los textos clásicos de resistencia de los materiales y que responde, matemáticamente a la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{M.y}{I}$$

Siendo:

- σ = esfuerzo de flexión en el elemento, que se expresa en unidades de fuerza/unidades de superficie o longitud al cuadrado (F/L^2);
- M = momento de flexión (máximo), expresado en unidades de fuerza x unidades de longitud ($F.L$);
- y = distancia desde el eje neutro de la sección transversal hasta la fibra más alejada del mismo, ya sea en tracción o en compresión, expresada en unidades de longitud (L);
- I = momento de inercia de la sección transversal del elemento, expresado en unidades de longitud a la cuarta potencia (L^4).

Como se sabe, el momento de inercia (I) es la propiedad mecánica que determina las dimensiones de la sección transversal del elemento. En términos de la dialéctica, definamos al momento de inercia como la **cantidad** en el elemento. Por otra parte, la **cualidad**, la expresamos en términos de la resistencia a la flexión o aquel esfuerzo de flexión que es capaz de soportar con determinadas dimensiones o momento de inercia (Benítez, 2005).

Es evidente que la cualidad (resistencia del elemento estructural, expresada como esfuerzo de flexión) es una función de la cantidad (dimensiones de la sección transversal, expresadas como momento de inercia).

O, dialécticamente: “si se quiere modificar la cualidad del elemento (resistencia o esfuerzo) necesariamente se debe cambiar la cantidad del mismo (momento de inercia)”.

Análogamente y a la inversa, “la cantidad (momento de Inercia) del elemento sólo es posible de modificarse alterando la calidad del mismo (resistencia)”.

Se puede demostrar que esta ley (de la dialéctica) es aplicable al diseño y análisis de los elementos estructurales sometidos a cualquier tipo de esfuerzo en la ingeniería estructural.

Otra manera de concebir la ley del paso de la cantidad a la cualidad en la mecánica de los materiales.-

Consideremos un elemento estructural, una barra, sometido a una carga que produce un esfuerzo combinado de flexión más compresión. Las columnas en los sistemas estructurales son un ejemplo de este tipo de elementos. La figura 2, representa gráficamente este elemento.

Donde:

P = fuerza de compresión;

M = momento de flexión.

Tal como se ha mencionado en el párrafo precedente, este es un elemento sometido a un esfuerzo combinado de flexión más compresión, es decir, para su cálculo, diseño y análisis deben usarse adecuadamente los criterios y ecuaciones que rigen tanto la flexión como la compresión (principio de superposición).

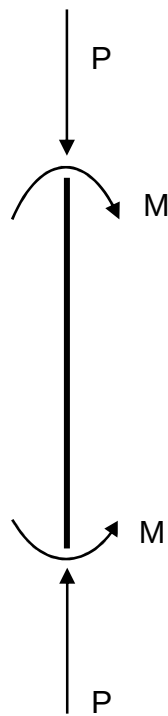


Figura 2: elemento sometido a compresión más flexión

Sin embargo:

- Si el momento flector M se hace igual a cero y se mantiene el valor de P diferente de cero, es decir, si se cambia la **cantidad** de carga en el elemento, éste se convierte en otro, con propiedades diferentes al original. El elemento ya no es el mismo y, por lo tanto, habrá cambiado también su **cualidad**. Se transforma en una columna sometida solamente a compresión (compresión pura) y, para el análisis y diseño de un elemento bajo estas condiciones se usan sólo los criterios y ecuaciones que rigen el diseño a la compresión pura. Para expresarlo en términos dialécticos: una **adición o una sustracción cuantitativa** de carga en el elemento, llega a un determinado umbral; si por una nueva adición o sustracción cuantitativa se pasa (o iguala) esa frontera, se produce otro cuerpo con propiedades **cualitativas distintas del anterior**.
- Análogamente, si se hace $P = 0$, es decir si se produce una sustracción **cuantitativa** de la carga de compresión, hasta llegar al umbral (cero), se produce otro elemento con una **cualidad** diferente, una viga sometida solamente a flexión pura. Consecuentemente, sus peculiaridades son diferentes del original y, por lo tanto, los criterios y ecuaciones que regulan el análisis y diseño son también otros.

La generalización también es posible si se tiene un elemento sometido a una más compleja combinación de cargas.

El centro de gravedad de la sección de un elemento estructural visto con “ojos dialécticos”.-

La unidad estructural elemental de la resistencia de los materiales, digamos una barra, tiene dimensiones. Llámense estas dimensiones: L (longitud), b (ancho de la sección transversal) y h (altura de la sección transversal). Este elemento, en la

práctica de la mecánica de los materiales y de la ingeniería civil en general, tiene una manera simplificada de representarse gráficamente:

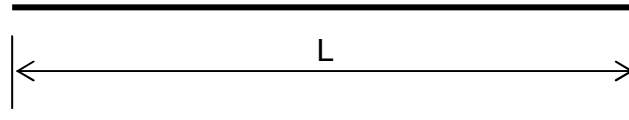


Figura 3: elemento barra cualquiera

Como puede apreciarse, no se distinguen las dimensiones de la sección transversal ($b \times h$). Es más, el resultado de un corte o sección transversal en el anterior esquema (de acuerdo a la práctica del dibujo de la ingeniería) será un punto. Pero, un punto no tiene dimensiones y la sección transversal sí las tiene. ¿Contradicción?. Sí, pero esta contradicción se sintetiza, en términos dialécticos, con el uso del “centro de gravedad”, concepto con el que estamos familiarizados los ingenieros civiles.

En resumen:

- Término original: sección transversal del elemento con dimensiones.
- Término contradictorio: sección transversal sin dimensiones (un punto).
- Término que supera, pero que contiene y sintetiza a los dos anteriores: centro de gravedad del elemento (que considera las dimensiones pero se representa mediante un punto).

En este ejemplo, también se evidencia una transformación, una dinámica del elemento, que consiste básicamente en los siguientes momentos:

- Concepción del elemento como una línea recta (teniendo un punto como sección transversal) para fines de representación o lenguaje gráfico del ingeniero (modelo gráfico).
- Modelo matemático de cálculo (según el tipo de esfuerzo al que esté sometido el elemento). Aquí se toman en cuenta las dimensiones de la sección transversal.
- Modelo físico (laboratorio) que permite determinar las propiedades resistentes del elemento. También se consideran las dimensiones de la sección transversal.
- Materialización (construcción) del elemento como es en la realidad práctica de las estructuras de la ingeniería civil (con dimensiones).

Se puede pensar en otros casos en los cuales la dinámica, tanto real como conceptual, se presenta en la mecánica de los materiales.

Esta dinámica permite pensar en la unidad teoría-práctica que, evidentemente, necesitan asimilar los estudiantes de la mecánica de los materiales.

Se concluye esta parte indicando que, la “dialéctica de la mecánica de los materiales” presentada anteriormente permite tener una lectura diferente, en términos de interpretación, de una ciencia imprescindible para el ingeniero civil.

CONCLUSIONES

- Con ejemplos muy específicos, se ha esbozado la construcción de una dialéctica de la resistencia de los materiales, para lo cual, ha sido fundamental la aplicación de las leyes de la dialéctica.
- La incorporación del materialismo dialéctico, en términos de las leyes de la dialéctica, a la resistencia de los materiales conduce a una reconciliación entre la

filosofía y la ingeniería porque el método dialéctico, tal como ha sido concebido por Marx y Engels, ha permitido elaborar una propuesta que tome en cuenta la dinámica (el movimiento), tanto de los conceptos como del objeto mismo de la ciencia citada. De esta manera el estudiante de la resistencia de los materiales tiene una opción alternativa para interpretar sus fenómenos.

- Considerando los resultados hasta aquí alcanzados, se pueden aplicar las leyes de la dialéctica a la interpretación de otras ciencias de la ingeniería estructural en particular y la ingeniería civil en general. El grado de generalización del citado enfoque es tan grande que, además de tener un sustento teórico, se afirma aún más con los resultados alcanzados en la práctica en muchos campos del saber científico, por ello insistimos en su extensión dentro de la ingeniería civil y su didáctica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Benítez, A. (2005). **Modelo didáctico para la asignatura “mecánica de materiales” a partir de la teoría de la actividad y de la dialéctica de las estructuras mecánicas elementales**. Tesis de M.Sc., Universidad de La Habana y Universidad Autónoma J.M. Saracho, Tarija (Bolivia).
2. 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.
3. Norris y Wilbur (1982). **Análisis elemental de estructuras**. McGraw Hill, México.
4. Hibbeler, R.C. (1998). **Mecánica de materiales**. Prentice Hall, México.
5. Rod, W. (1977). **La filosofía dialéctica moderna**. Ediciones Universidad de Navarra, S.A-, Pamplona.
6. Valverde, C. (1979). **El materialismo dialéctico**. Espasa – Calpe, S.A., Madrid.
7. Timoshenko, S.P. (1983). **History of Strength of Materials**. Dover Publications, New York, USA.