

LOS AVANCES EXPERIMENTADOS EN EL MARCO DE LA INVESTIGACIÓN EN LA MODELIZACIÓN Y EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMAS CONSTRUCTIVOS

(PROGRESS IN MODELLING AND ANALYSIS OF CONSTRUCTION SYSTEM PERFORMANCE)

E. Alarcón, Universidad Politécnica de Madrid

Fecha de recepción: 12-XII-05

ESPAÑA

405-5

RESUMEN

En este artículo se hace una breve descripción de la evolución en el Siglo XX de los modelos abstractos utilizados para calcular el comportamiento de los sistemas constructivos y se analizan algunos temas con futuro.

SUMMARY

This article briefly describes the twentieth century evolution of the abstract models used to calculate construction system performance and analyzes certain issues of interest for the future.

1. INTRODUCCIÓN

En líneas generales puede decirse que hasta la II Guerra Mundial continúa la exploración de posibilidades de ideas decimonónicas. Durante aquélla, la aplicación de medios ingentes, tanto humanos como económicos, da un impulso extraordinario a la investigación de equipos conjuntos universidad-empresa apoyados por los gobiernos. Esto produce un avance considerable del conocimiento, marca una estrategia de funcionamiento para el futuro y provoca la aparición de nuevos instrumentos entre los que, para este artículo, destaca la puesta a punto de las computadoras.

La segunda mitad de siglo está marcada por la reconsideración de todo el conocimiento anterior a partir de su posibilidad de aplicación con el nuevo artefacto; su difusión mundial y el incremento del número de investigadores ha permitido un desarrollo explosivo de los métodos computacionales. El incremento de la potencia de cálculo ha permitido también la exploración de nuevas ideas en temas relacionados con la seguridad, las acciones, la monitorización, el control activo de estructuras, etc. Ello abre un panorama de alcance insospechado que está conduciendo a evoluciones conceptuales como el

cambio a proyectos basados en prestaciones, que está revolucionando tanto los diseños como las normas de buena práctica, o los sistemas de seguimiento del comportamiento de la estructura a lo largo de su vida.

En la primera parte del artículo se comenta la evolución de los métodos de cálculo y a continuación se realizan breves consideraciones sobre algunos temas particulares.

2. LA EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS ABSTRACTOS HASTA MEDIADOS DEL SIGLO XX

Tras los esfuerzos de sistematización de Cauchy, Navier, Maxwell, Neumann, Saint-Venant, Kirchhoff y Clebsch⁸ el siglo XIX deja como líneas magistrales para el cálculo de estructuras los métodos basados en el principio de los trabajos virtuales¹ (Mohr, 1874), la estática gráfica creada por Culmann² (1866) y los métodos energéticos propuestos por Castigliano³ (1879) y popularizados por Müller-Breslau (1886)⁴.

Como se indicará más adelante estos son los autores más influyentes en los profesores españoles, que debieron optar entre las diferentes posibilidades. Ni Mohr ni Culmann

llegaron a aceptar que el método de Castigliano aportase alguna novedad, y pronto, Crotti⁵ y Engesser⁶ mostraron que era errónea la apreciación de aquél sobre la naturaleza de la energía que se deriva para obtener los desplazamientos. De hecho, energía elástica y energía complementaria aparecen relacionadas por una transformación de Legendre que posibilita la canonización del planteamiento en forma semejante a la desarrollada por Hamilton. Esta línea fue seguida por Max Born y Hellinger que en 1914 estableció el Principio Canónico de la Energía Potencial, base de los desarrollos posteriores de Reissner, Veubeke y Washizu. Ello no impide reconocer que el Principio de los trabajos virtuales es la base de todos los principios variacionales y que, a pesar de los ataques de Müller-Breslau, Mohr estaba en lo cierto.

En 1877 aparece la primera edición de la teoría del sonido de lord Rayleigh⁷ que todavía se puede leer con aprovechamiento y en la que se ponen las bases del método que, desarrollado por Ritz⁸ (1908) y popularizado por Timoshenko⁹ (1910) en sus aplicaciones ingenieriles, ha dado lugar a los mejores planteamientos de la teoría de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, análisis funcional y métodos proyectivos de aproximación (Figura 1). También a principios de siglo (1909) se produce la interesante interpretación de la elasticidad por los hermanos Cosserat¹⁰ que, en el equilibrio del tetraedro elemental, además del vector tensión, introducen el momento por unidad de superficie dando lugar a la teoría de los medios micropolares.

A partir de este momento son continuos los movimientos liderados por la escuela rusa (Galerkin, Sobolev, Mushkelsvili, Novozhilov) que conducen a una clarificación del enfoque matemático de la elasticidad, así como aportaciones tanto matemáticas (Klein, Hilbert, Volterra, Almansi, Jaumann, Synge, Love, Trefftz o Biot), como fi-

sicas (Reiner, Rivlin, Prandtl, Flügge, Koiter, Griffith, Drucker, Prager), Figura 2.

Es a mitad de siglo cuando Truesdell¹¹ inicia la reconsideración de los planteamientos no-lineales y el rigor de las definiciones que ha conducido al desarrollo de lo que podría llamarse una escuela físico-matemática, muestra de lo cual son las obras de Villaggio¹² y Marsden y Hughes¹³.

Para comprender la situación en España conviene repasar la línea tomada en la Escuela de Caminos con la Elasticidad y Resistencia de Materiales desde su fundación. A este respecto cabe indicar que, a falta de aportaciones originales, siempre se mantuvo un importante contacto con las publicaciones extranjeras lo que permitió a la profesión mantenerse al tanto de lo que sucedía. Así, Saavedra, autor de varias publicaciones combina su interés por los planteamientos teóricos de Poncelet y Navier con los trascendentales ensayos de Fairbairn, cuya obra sobre aplicaciones del hierro fundido y forjado a las construcciones fue traducida y publicada, casi simultáneamente, con la versión inglesa.

Además, en época muy temprana, escribe el que probablemente sea el primer libro en español de Resistencia de Materiales, absolutamente influido por la Escuela francesa, como demuestra también su extraordinaria obra sobre puentes colgados.

Lo mismo puede decirse respecto al contacto con el exterior de Echegaray y Zafra, a quienes Torroja reconoce como sus maestros «... cuando se siente el influjo de la savia matemática que Echegaray y Zafra vierten con sus teorías de la Elasticidad y de las Estructuras, respectivamente...»¹⁴, aunque en el caso del último la influencia es predominantemente alemana.



Lord Rayleigh



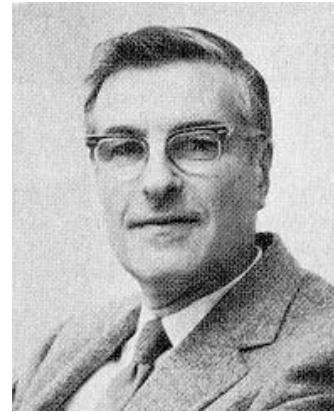
Timoshenko



Reissner



Prager



Drucker

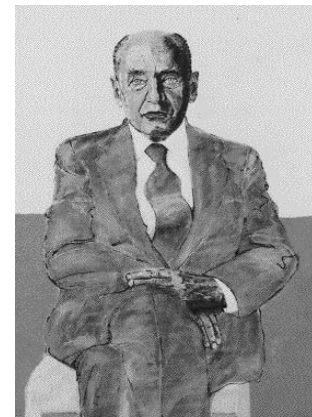
Figura 2



Zafra



Torroja



Fernández Casado

Figura 3

En relación con el contenido de este artículo, interesa más la figura de Zafra como sabio profesor y autor, aparte del primer tratado en español de hormigón armado, de uno de los mejores libros de cálculo de estructuras que se ha publicado en nuestro país¹⁵. En él da pruebas de dominar las obras de la escuela alemana y, quizá por influencia de Müller-Breslau, escoge el método de Castigliano basándose en muy discutibles apreciaciones: «... *A nuestro juicio el teorema de Castigliano, más amplio en concepción, menos artificioso que el de Mohr...*», aunque inmediatamente reconoce que «... *en la práctica usaremos indistintamente de uno o de otro...*». La puesta al día del libro se pone de manifiesto cuando, al estudiar los problemas de estabilidad elástica, se hace referencia a los trabajos de Timoshenko, publicados tan sólo cinco años antes.

Es de imaginar el impacto que el enorme prestigio de que Zafra gozaba causarían en la Escuela y por eso no es de extrañar que sus sucesores, Peña¹⁶ y Torroja, siguiesen la senda trazada por su maestro cuando debieron ocuparse de las enseñanzas de Resistencia de Materiales y Cálculo de Estructuras. Posteriormente, Florencio del Pozo mantendría el esquema de Torroja, con pequeñas variantes (Figura 3).

La línea de estática gráfica se había mantenido en el curso de Granda sobre Mecánica Aplicada a la Construcción¹⁷ y Entrecanales intentó reavivarla a partir de 1931, según cuenta Lorente de No en su excelente obra de 1952¹⁸.

Si el método energético era ideal para intentar conectar con los planteamientos canónicos de la mecánica racional, las publicaciones de Hardy Cross¹⁹ en los años 30 produjeron un impacto enorme que dejó tan desconcertados a los viejos maestros como el método de Castigliano había dejado a Mohr y Culmann. Así, en el capítulo VII de la tercera edición de su Mecánica Elástica, Peña escribe «*Si ahora volvemos la vista al capítulo V de esta obra ¿no está todo esto en cuanto a concepto y desarrollo, contenido en aquél capítulo? Pero con la diferencia de ser mucho más claro y de mayor facilidad didáctica aquél, además de que el proceso operatorio se hace más sistemático y de más diáfana representación gráfica. ¿Dónde está, pues, la originalidad del método de Cross?*» Opinión que contrasta con el entusiasta seguimiento del método por parte de toda la profesión y con la de Carlos Fernández Casado que, desde 1934, lo defendía desde la Revista de Obras Públicas, donde, en los años 50, se estableció una curiosa polémica sobre las estructuras traslacionales ce-

rrada brillantemente por Lorente de No. En la séptima edición de su libro más popular²⁰, Fernández Casado da la clave del éxito «... *El esquema de cálculo es siempre el mismo, lo cual permite al ingeniero o arquitecto que proyecta emplear el mínimo de tiempo en prepararlo y a los auxiliares que calculan hacerlo con el menor esfuerzo utilizando experiencias anteriores...*».

En este ambiente Torroja publica entre 1949 y 1954 la serie de Monografías²¹⁻²⁵ que han servido de base a la enseñanza de las Estructuras y de la Resistencia de Materiales en las escuelas de Caminos hasta bien recientemente, y que han sido utilizadas para estructurar los distintos bloques de la enseñanza de la mecánica estructural en muchas escuelas de ingeniería españolas.

Cabe decir que las opciones tomadas por Torroja para la enseñanza de los modelos abstractos son conservadoras en relación con sus conocimientos y eso se pone de manifiesto en su celebrado libro de Elasticidad²⁶ («*Torroja was a specialist in stress analysis as well as a designer and he wrote a highly regarded book on the mathematical theory of elasticity*»²⁷) donde, en aras de la sencillez, se renuncia al uso del cálculo tensorial y a los métodos de Muskhelishvili que, a través de las referencias, se demuestra conocer tanto como el libro de Clebsh, en la versión de Saint-Venant, que es el tratado cumbre de la Elasticidad clásica. En este tema, al igual que en cálculo de estructuras, el panorama español era muy bueno, con una obra de gran calidad dedicada a la enseñanza de los arquitectos (Arangoá²⁸ 1945) y algunos intentos de mayor profundidad, como el de Valdés Patac²⁹, desarrollado en el Instituto de la Construcción, o los estudios de Federico Goded, culminados en su interesante libro de 1959³⁰. Es la época en que Velasco de Pando³¹ publica su monografía sobre Plasticidad a la que seguirá la de Benito³², directamente inspirada por Torroja para ser utilizada como material docente, lo que ha cumplido sobradamente en sucesivas ediciones que han contribuido a formar la mentalidad de decenas de promociones de ingenieros.

Asimismo existen aportaciones a estos temas desde el otro foco de modernización creado alrededor de la también extraordinaria figura de Esteban Terradas. Aparte de su interesante libro sobre estabilidad³³, propició la publicación de tratados renovadores como el de Karman y Biot³⁴ donde la *filosofía* de la enseñanza a los ingenieros es «... *la necesidad no es de más matemáticas sino de una mejor comprensión sobre el modo de aplicarlas...*»; pero, sobre todo, creó un grupo de trabajo, el Seminario de Estudios Superiores de Física y Matemáticas donde, por ejemplo, tan sólo 2 años después que Koiter defendiese su revolucionaria tesis doctoral³⁵, propuso a M.A. Hacar su estudio y, de hecho, en el curso 1949-50 el programa del Seminario incluía «*Pandeo y abolladura de superficies*» como tema a desarrollar por Hacar y el propio Terradas. En este Seminario participa también Gregorio Millán

Barbany quien, además de sus aportaciones a la investigación de la combustión, desarrolló una muy actualizada teoría matemática de la Plasticidad³⁶.

Como puede verse el entorno era enormemente activo y brillante no sólo en lo relativo a Elasticidad y Cálculo de Estructuras sino también en cuanto a modelos de leyes de comportamiento nuevas como la plasticidad o la viscoelasticidad en la que Torroja y Paez³⁷ hicieron una interesante contribución recogida por Reiner .

Esa puesta al día continua, favorecida por las sistemáticas visitas de profesores extranjeros al Instituto de la Construcción, podría haber servido para enlazar con la etapa siguiente, dominada por el ordenador, si la muerte de Torroja, en 1961, no hubiese impedido el año sabático que Argyris³⁸, autor de una magnífica monografía sintética (1960)³⁹, tenía previsto disfrutar en el Instituto.

3. LOS MÉTODOS COMPUTACIONALES

A mitad de siglo se produce un cambio radical de orientación hacia el método de la rigidez debido a la aparición de ordenadores comerciales basados en la tecnología electrónica y en la idea de programa almacenado.

Además, en forma semejante al impulso que el desarrollo de los ferrocarriles dio a la Mecánica del Continuo en el siglo XIX, es en el marco de una nueva industria, la aeronáutica y astronáutica, que tiene que vérselas con estructuras de una complejidad formidable, donde surgen las mejores iniciativas.

Milagrosamente se produce la confluencia de herramienta, necesidades e ideas y, en 1956, se publica el artículo de Turner, Clough, Martin y Topp⁴⁰ (Figura 4) donde se vierten las primeras aplicaciones del método de los Elementos Finitos y que, desde entonces, es paradigma tanto de investigación como de aplicaciones prácticas.

La evolución ha sido tan fuerte y tan compleja que, desde la corta perspectiva personal, es imposible no dejarse guiar por los propios prejuicios.

En el campo del cálculo de estructuras de edificación la evolución fue difícil por varias razones. En primer lugar, la maestría alcanzada en el manejo de los métodos anteriores hacía difícil evitar reacciones semejantes a las descritas cuando surgió el método de Cross. Además, al cambio de enfoque teórico se sumaba ahora una barrera instrumental: los ordenadores, con lo que entonces se llamaba «*alta capacidad de cálculo*», sólo eran accesibles a personal especializado.

Ni los geotécnicos, por puro pragmatismo, ni los aeronáuticos, por juventud, tuvieron problemas de adap-

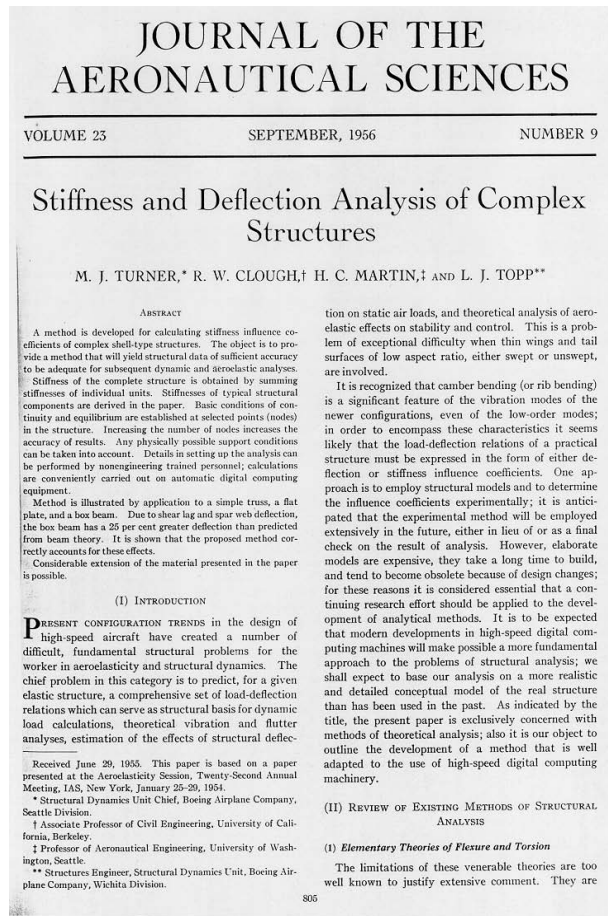


Figura 4

tación y a ellos se deben, probablemente, las primeras soluciones con elementos finitos a problemas de mecánica del continuo (v.g.: Jiménez Salas 1982⁴¹). Los estructuralistas o bien miraban al foco práctico del cálculo matricial de estructuras (cuando ya dos obras de carácter docente^{39,42} habían vuelto a poner de manifiesto el lu-

gar clave que ocupa el principio de los trabajos virtuales en toda formulación) o bien, los más teóricos, admiraban la forma que tenían los matemáticos de atacar problemas que se creían resueltos. Por ejemplo, Alberto Dou⁴⁴ participa en el movimiento de lo que ahora se denominan métodos cualitativos¹², que constituyen una brillante síntesis entre las ideas de Signorini en los años 30 y los progresos realizados en los 50 para resolver el problema de existencia mediante la formulación débil de los problemas con valores en el contorno (Figura 5).

Con la experiencia en el uso del cálculo matricial sobre el que enseguida se dispuso de obras clave, tanto traducidas⁴³ como españolas⁴⁵ se intentó pasar a mayores empeños motivados por la participación de Zienkiewicz en el cálculo de algunas presas bóveda españolas y la publicación de su libro⁴⁶ donde se ponía de manifiesto la posibilidad de aplicación a problemas no estructurales y que, por tanto, que se estaba ante una herramienta de calado incomparable a todas las que se habían dispuesto antes.

Llegaban además ecos de las originales ideas de Irons y del enfoque que, según la tesis doctoral de C. Felippa⁴⁷ (1966), colocaba a los elementos finitos en el marco del método de Rayleigh-Ritz y los trabajos virtuales.

Ello hizo que al volver los ojos a lo que en el ínterin habían estado haciendo los matemáticos se viese que, tanto Courant⁴⁸ como Synge⁴⁹, manejaban ideas parecidas y que la teoría generalizada de problemas con condiciones en el contorno desarrollada por la escuela de Lions⁵⁰ aportaba puntos de reflexión en los que valía la pena entrar, como demostraban Strang y Fix⁵¹ (1973). Precisamente en este mismo año dieron cursos en España Fraeijs de Veubeke, en la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos y Carlos Brebbia, en el Colegio de Ingenieros de Caminos, donde, este último, presentó su obra⁵² -primera- sobre elementos finitos traducida al español.



Dou



Jiménez Salas



Páez

Figura 5

Por si cabía alguna duda, en la segunda mitad de los 70 se pudo disponer de una fundamentación utilizable para la enseñanza^{53,54} o para la investigación⁵⁵, así como de la magistral obra de Bathe y Wilson (1976)⁵⁶ en la que medio mundo aprendió las técnicas de programación utilizadas por la escuela de Berkeley.

En España, en esta época, son dignos de mención dos fenómenos: por un lado se utilizan sistemáticamente programas comerciales de elementos finitos para estructuras de gran responsabilidad como las centrales nucleares, y, por otro, se produce un cambio de filosofía en la dedicación del profesorado de las Escuelas que conduce a un incremento de la actividad investigadora, y a estancias en el extranjero de jóvenes estudiosos que, a su regreso, traen los nuevos instrumentos, en cuyo desarrollo a nivel mundial participan⁵⁷ o bien permanecen en Universidades extranjeras contribuyendo, desde allí, al desarrollo del conocimiento, como Roësset, Simó y Ortiz, en EE.UU., Sánchez Palencia en Francia, Carlos Ruiz en Inglaterra, etc.

Los últimos años han visto reforzarse aquellas tendencias, debido a la popularización de los ordenadores personales y a su continuo aumento de potencia y de velocidad de cálculo, así como a la aparición de revistas y asociaciones dedicadas a los llamados «*métodos computacionales*» que sistemáticamente organizan congresos de gran éxito. En este ambiente no es de extrañar que sea habitual la contribución de investigadores españoles al progreso de la mecánica estructural y que, en esa cordillera, hayan surgido picos, como el malogrado Juan Carlos Simó (1952-1994)

Juan Carlos floreció en el activo ambiente de trabajo de las mejores universidades de California: en Berkeley, al principio, donde mantuvo una fructífera colaboración con Miguel Ortiz (actualmente profesor en Caltech), y luego en Stanford. Las raíces de ambos están en línea con las obras de Truesdell⁵⁸, Malvern⁵⁹ y Gurtin⁶⁰ y, sobre todo, con las aplicaciones de la geometría diferencial moderna^{61,63} a la Mecánica. Sobre esta sólida base físico-matemática construyó Simó sus trabajos en métodos computacionales, donde se le deben tanto nuevos tipos de elementos como técnicas de resolución y formulaciones teóricas que llevan su nombre⁶². La Sociedad Española de Métodos Numéricos en Ingeniería (SEMNI), fundada por el empuje e iniciativa de Eugenio Oñate, honra, cada cuatro años, al joven investigador más prometedor con un premio que lleva también el nombre de Juan Carlos.

4. ALGUNAS LÍNEAS CON FUTURO

4.1. Enseñanza

En los últimos treinta años ha sido constante la duda sobre cómo aprovechar todas las ventajas de la nueva situación

y cómo establecer una enseñanza que no perdiera de vista ni la formación de *conceptos* ni la habilidad de interpretación de resultados.

Tras las líneas anteriores parece claro que la renovación de la enseñanza debe partir de dos premisas:

a) Al disponer de una poderosa herramienta de cálculo, la materialidad de la resolución numérica importa menos que la formulación del modelo y la interpretación de resultados.

b) Si se consigue una formulación unificada, una dorsal que articule los conocimientos, será más fácil apreciar la importancia y diferenciación de las hipótesis subyacentes en los modelos de cálculo y, por tanto, se facilitará al proyectista la selección del más adecuado a su problema.

En mi opinión esa línea conductora arranca del principio de los trabajos virtuales y se articula a su alrededor mediante el método de la rigidez. Sobre ella caben pequeñas variaciones para que el estudiante tenga noticia de los métodos históricos.

Cómo armonizar la enseñanza teórica, irrenunciable para la formación, con el tratamiento de modelos mediante programas prefabricados es el desafío que se plantea para el futuro.

4.2. Investigación

Según se ha insinuado en las líneas anteriores el progreso de los métodos de cálculo se ha visto afectado por las continuas modificaciones técnicas de los ordenadores, que han llevado a cambios en la filosofía de actuación (v.g.: cálculo en paralelo) o al desarrollo de algoritmos numéricos especialmente adaptados al computador (longitud de arco, Lanczos, etc.) que mejoran la rapidez y exactitud de los cálculos. Prescindiendo de estas substanciales aportaciones son dignos de destacar algunos campos que se refieren a la propia **fundamentación** de la mecánica de los medios continuos, al desarrollo de nuevas **leyes de comportamiento**, a la puesta a punto de **métodos numéricos** alternativos al de elementos finitos y a nuevas **aplicaciones**.

En algunos casos se retoman temas clásicos con la nueva óptica y casi siempre se observa que es imposible considerar acabado cualquiera de ellos; un ejemplo típico lo constituyen las formulaciones con elementos de contorno, cuya utilidad se suponía limitada a medios lineales heterogéneos a trozos, que actualmente están siendo aplicadas a todo tipo de cuestiones no lineales apoyándose en las nuevas formulaciones hipersingulares y en la enorme velocidad de cálculo de los nuevos ordenadores. Lo mismo sucede con formulaciones básicas como la de los medios orientados o los temas de localización y fractura.

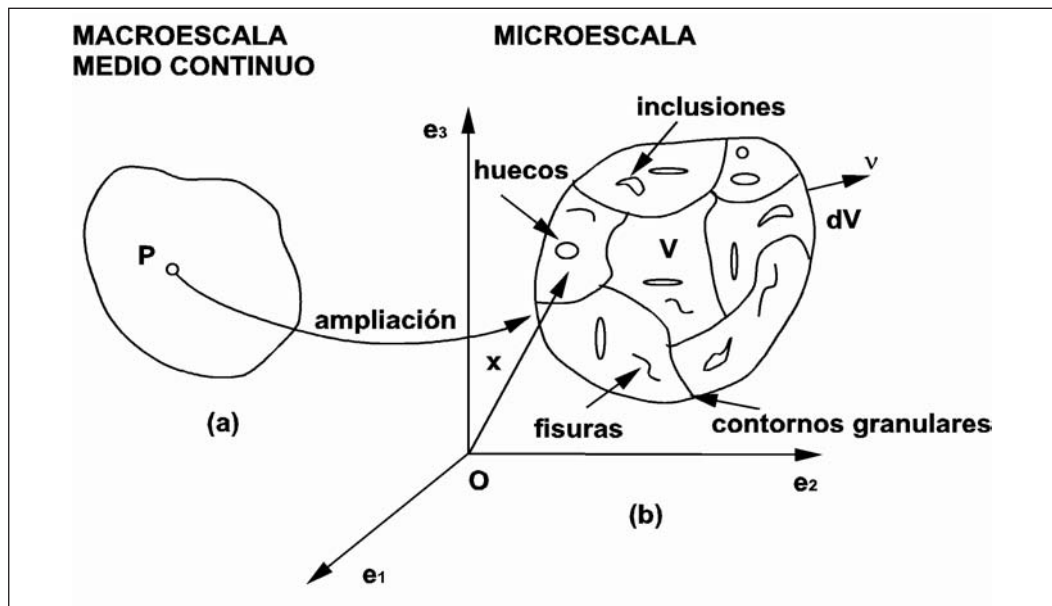


Figura 6.- Construcción del volumen representativo.

En contra de lo que pudiese parecer, la **fundamentación** conceptual ha sido sometida a una fuerte revisión. La idea más atractiva es pasar del método inductivo, basado en ensayos de validez limitada, al deductivo, en que se haga participar a la microestructura para conseguir, a partir de modificaciones en la misma, materiales con propiedades macroscópicas *a medida*. La clave es la consecución de una escala que permita aprovechar las ventajas de la formulación macroscópica tras haber promediado las características microestructurales típicas del material y del fenómeno en estudio.

En cualquier caso se necesita una idea clara de la situación respecto a las leyes físicas globales y, por ello, la formulación termodinámica es imprescindible, aunque sigan existiendo polémicas sobre el tratamiento de los procesos irreversibles. Esta misma conflictividad y viveza de investigación existen en la representación de los procesos de localización del fallo y que puede influir tanto a escala global como local de la estructura, pudiendo imaginarse lo que ello representa respecto a la reconsideración de los métodos de cálculo generalmente aceptados. Parece precisarse un paso semejante al dado en los problemas de inestabilidad donde la tesis de Koiter y la obra precursora de Thompson y Hunt⁶³ (1973) han permitido encuadrar la investigación en los campos de la teoría de catástrofes y caos que conectan también con los nuevos desarrollos sobre problemas dinámicos no lineales. Cabe citar finalmente las aplicaciones matemáticas a la teoría de fiabilidad de estructuras que, en su forma clásica (métodos de nivel II), subyace en la filosofía de los nuevos códigos de buena práctica.

Las **leyes de comportamiento** que se estudian son cada vez más complicadas y se ha asistido a una reconsideración y generalización de las clásicas aproximaciones de plasti-

cidad y viscoelasticidad. Una rama de espectacular desarrollo, es la mecánica de la fractura que, desde las ideas clásicas de Griffith (1920) ha evolucionado sin cesar, tanto en conceptos como en aplicaciones. En otros casos, una nueva idea, la de degradación o daño, ha permitido reproducir fenómenos muy complejos, con formulaciones relativamente sencillas y está en el núcleo de gran cantidad de aplicaciones prácticas actuales⁶⁴. Está, por supuesto, el campo de los materiales compuestos, activo desde las primeras teorías desarrolladas en los años 70, y un extraordinario desarrollo de la poroelasticidad, basados, ambos, en sus aplicaciones industriales y a la bioingeniería.

En cuanto a los **métodos** alternativos al de elementos finitos la búsqueda ha sido continua. Ya se han comentado los métodos de contorno basados en las fórmulas clásicas de representación que han sido utilizadas para problemas específicos pero que asisten a un desarrollo mantenido. Son dignos de citar otros métodos que se han propuesto como alternativa para problemas no elípticos como el de partículas⁶⁵, o el de volúmenes finitos, muy usado en fluidos y para el que se dispone de programas comerciales que pueden ser utilizados en problemas recientes que conectan con formulaciones de campos alejados del estructural (Figura 6).

También son destacables las líneas abiertas que intentan utilizar elementos finitos móviles así como aquéllos basados en la autoadaptabilidad de la malla o del grado del polinomio según la magnitud del error cometido, lo que entronca con los métodos espectrales. Cabe citar, finalmente, dos líneas interesantes, que aprovechan la formulación multicampo de los principios variacionales propuestos por C. Felippa y los llamados elementos sin malla, donde se aprovecha la experiencia conseguida con los elementos de contorno.

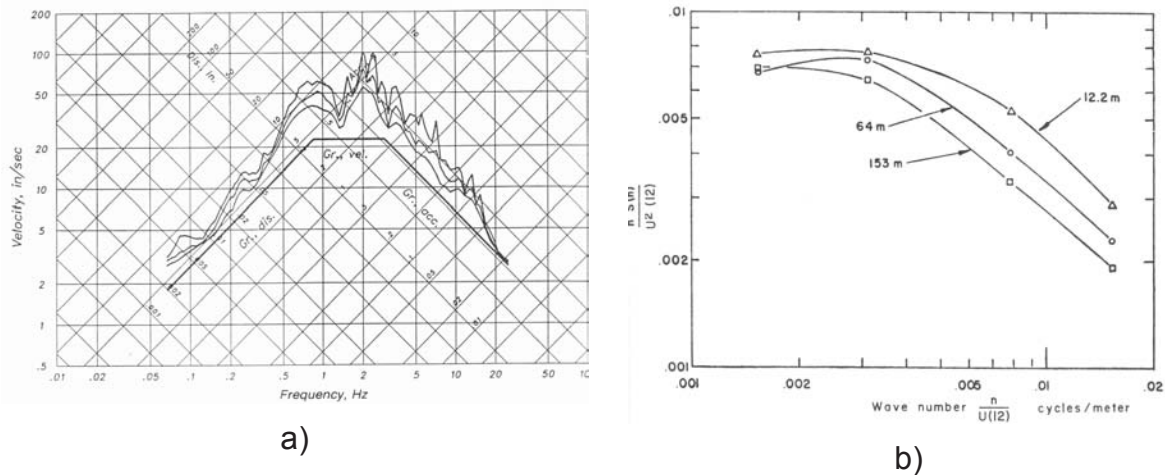


Figura 7.- Acciones dinámicas.

El campo de **nuevas aplicaciones** es interminable, como muestran algunos libros recientes que se refieren a la utilización en estructuras minúsculas⁶⁶ o grandes⁶⁷. En este sentido cabe citar la hibridación con las técnicas de control activo y pasivo⁶⁸ y robótica, esta última cada vez más aplicada a problemas relacionados con la construcción. Están también las aplicaciones continuas a biología y medicina, sin olvidar campos más clásicos⁶⁹, pero de interés creciente para la seguridad frente a riesgos naturales

5. OTROS TEMAS

5.1. Acciones dinámicas

El siglo XX ha alumbrado también nuevas ideas respecto a la modelización de acciones dependientes del tiempo como los sismos o el viento.

En ambos casos la clave ha consistido en pasar de la definición en el tiempo a la representación en frecuencia donde el promediado y alisado es más sencillo. En el caso de sismos, la representación se lleva a cabo como respuesta de sistemas con un grado de libertad, y, por eso, se denomina "espectro de respuesta" (Figura 7a)

Para poder definirlo fue preciso el despliegue de acelerómetros capaces de registrar en distancias próximas al epicentro y, por ello, no fue, hasta los años 50, que se dispuso de los primeros conjuntos de espectros de acelerogramas reales cuya normalización, promediado y alisado permitieron visualizar las primeras formas y un tratamiento sistemático posterior de cada nuevo acelerograma han permitido definir los espectros típicos que contienen actualmente nuestras Normas.

En el caso del viento el tratamiento es sobre la densidad espectral de potencia (Figura 7b) y, de nuevo, sólo ha sido posible cuando se ha dispuesto de datos suficientes y de una comprensión de la circulación del aire en las capas bajas de la atmósfera.

Estas definiciones han propiciado también el desarrollo del cálculo dinámico aleatorio con logros bien establecidos o en el análisis de peligrosidad imprescindible para la zonificación del territorio.

En cualquier caso, de nuevo, se asiste a un progreso basado en la capacidad de la computadora para el tratamiento de ingentes cantidades de información.

5.2. La seguridad

Ya se ha hecho un somero comentario sobre el desarrollo de los métodos de Fiabilidad estructural en que Páez y Torroja tuvieron un papel tan destacado.

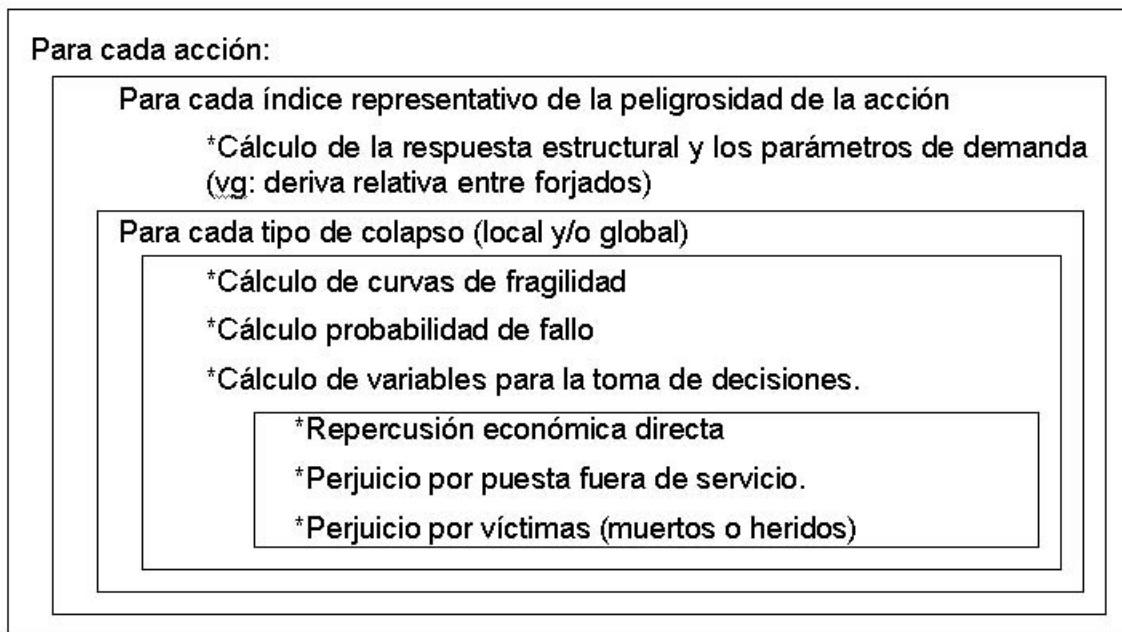
Estos métodos se combinan ahora con estructuras o medios continuos en que las propiedades están definidas mediante campos aleatorios lo que permite diferentes subproductos entre los que se encuentra la indicación sobre los parámetros más influyentes y, por tanto, sobre los que hay que incrementar los ensayos para reducir la incertidumbre.

También es interesante para el futuro el nuevo concepto de proyecto basado en prestaciones que, junto con la evolución hacia estructuras más flexibles y los requisitos sobre desplazamientos limitados, ha hecho evolucionar los sistemas de proyecto hacia nuevos puntos de vista.

En particular, si por ejemplo se trabaja con la seguridad frente a colapso, un esquema típico del proyecto en prestaciones (Cuadro 1), estaría basado en la previa definición de índices representativos de una determinada acción (vg: aceleración espectral para el modo fundamental de la estructura en el caso sísmico).

En la literatura norteamericana los tres últimos factores son la llamada triple D: Dollars, Downtime & Deaths (que, para mantener la inicial, podrían traducirse por Desembolso, Desuso y Decesos)

Cuadro 1



5.3. Las estructuras adaptables

La experiencia con las estructuras para el espacio han demostrado que se pueden controlar de forma continua y adaptarlas a cualquier situación en tiempo real.

Por otro lado, los avances llevados a cabo en sensores, actuadores y tecnología de microprocesadores, tanto en cuanto a miniaturización como a costes, han estimulado el estudio de diseños semejantes a los precitados, en estructuras terrestres.

Ello es especialmente interesante frente a acciones como sismo y viento donde, frente al aislamiento “pasivo” que hace que la estructura tenga las mismas características a lo largo de su vida, aparecería una estructura “inteligente” capaz de variarlas para adaptarse a sollicitaciones instantáneas.

En estos momentos ya existen actuadores, generalmente del tipo que varía la longitud de los elementos, aunque nuevos materiales como los electroreológicos, aplicados actualmente a control de movimientos nodales, podrían extender su campo de aplicación.

Se llegaría así a las estructuras “adaptables” como una variante, con conocimiento incorporado, de la estructura pasiva tradicional. Es un campo en pleno desarrollo y con un futuro muy prometedor.

REFERENCIAS

- (1) O. Mohr: «Beitrag sur Theorie des Bogenfachwerks». Zeitsch. Des Arch. Und Ing. zu Hannover 1874.
- (2) C. Culmann:»Die graphische Statik». ETH 1866

- (3) C. A. P. Castigliano: «Theorie de l'équilibre des systèmes élastiques et ses applications». Negro 1879
- (4) H. F. B. Müller-Breslau: «Die neueren Methoden der Festigkeitslehre und der Statik der Baukonstruktionen». Baumgartner. 1886
- (5) F. Crotti: «La teoria dell elasticità». Hoepli 1888
- (6) F. Engesser: «Über statisch ubbestimmte Träger. . . «Zeitsch. Archit. Und Ingen. Hannover. 1889
- (7) J. W. Strutt (Rayleigh): «The theory of sound». Cambridge 1877. Reimpresión Dover 1945
- (8) W. Ritz: «Über eine neue Methode. . . «. Zeitsch. Reine und Angew. Mathem. 1909
- (9) S. P. Timoshenko: «Einige Stabilitätsprobleme der Elastizitätstheorie». Zeitch. Mathem. und Phys. 1910
- (10) E. Y F. Cosserat: «Theorie des corps deformables». Hermann. 1909
- (11) C. Truesdell: «A program of physical research in classical mechanics». Z. Angew. Math. Phys. 1952
- (12) P. Villaggio: «Qualitative methods in Elasticity». Noordhoff. 1977
- (13) J. E. Marsden y T. J. R. Hughes: «Mathematical foundations of elasticity «. Prentice Hall 1983
- (14) E. Torroja: «Laboratorios». Revista O. P. Número del Centenario. Mayo 1953
- (15) J. M. de Zafra: «Cálculo de estructuras». 2 tomos. Tejada y Martín. 1915
- (16) A. Peña Boeuf: «Mecánica Elástica». 2ª edición. 1936
- (17) B. Granda: «Curso de Mecánica aplicada a la Construcción». Tordesillas 1909
- (18) C. Lorente de No: «Síntesis de los métodos de la Elasticidad. La pieza elástica». Aguilar 1952
- (19) H. Cross y N. D. Morgan: «Estructuras continuas de hormigón armado». Dossat 1944
- (20) C. Fernández Casado: «Cálculo de estructuras reticulares». Dossat. 7ª edición 1958.
- (21) E. Torroja: «Fundamentos para el cálculo de estructuras lineales planas». Monografías I. T. C. C. 1949
- (22) E. Torroja: «Determinación de esfuerzos en vigas rectas». Monografías I. T. C. C. 1949

- (23) E. Torroja: «Cálculo elemental de vigas trianguladas». Monografías I. T. C. C. 1949
- (24) E. Torroja: «Cálculo de esfuerzos en estructuras con piezas curvas». Monografías I. T. C. C. 1951
- (25) E. Torroja: «Cálculo de esfuerzos en estructuras reticuladas». Monografías I. T. C. C. 1954
- (26) E. Torroja: «Lecciones elementales de elasticidad». Dossat 1945
- (27) D. P. Billington: «The tower and the bridge». Princeton U. P. 1983
- (28) A. García de Arangoá: «Elasticidad teórica y experimental». Dossat 1945
- (29) F. Valdés Patac: «Curso de Elasticidad». I. T. C. C. 1949
- (30) F. Goded: «Elasticidad y funciones de tensión». Dossat. 1959
- (31) M. Velasco de Pando: «Plasticidad. Nueva teoría y aplicaciones». Esc. Ing. Indust. 1954
- (32) C. Benito: «Nociones de cálculo plástico». R. O. P. 1959
- (33) E. Terradas: «De la estabilidad geométrica en estructuras elásticas». Esc. Ing. Caminos. 1926
- (34) T. V. Karman y M. A. Biot: «Métodos matemáticos en ingeniería». INTA 1945
- (35) W. T. Koiter: «Over de Stabiliteit van het elastisch Evenwicht». Tesis doctoral. Delft. 1945. Traducido al inglés como: «The stability of elastic equilibrium». Technical report Air Force flight dynamics laboratory. USA 1970
- (36) G. Millan Barbany: «Introducción a la teoría matemática de la plasticidad». Seminario de Matemática Aplicada. Mayo 1953
- (37) E. Torroja y A. Páez: «Set concrete and reinforced concrete». (Cap. VIII en M. Reiner «Building materials; their elasticity and inelasticity»). North Holland 1954
- (38) J. H. Argyris: Comunicación personal.
- (39) J. H. Argyris y S. Kelsey: «Energy theorems and structural analysis». Butterworths. 1960
- (40) M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin y L. J. Topp: «Stiffness and deflection analysis of complex structures». Jour. Aeron. Sci. 1956
- (41) J. A. Jiménez Salas: «Aportaciones científicas españolas a la Geotecnia». Discurso de ingreso en la Real Acad. Ciencias. 1982.
- (42) B. G. Neal: «Structural theorems and their applications». Pergamon. 1964
- (43) R. K. Livesley: «Matrix methods of structural analysis». Pergamon. 1964. Traducción española de J. Martínez Calzón para Blume. 1970
- (44) A. Dou: «Upper estimate of the potential elastic energy of a cylinder». Comm. On pure and app. Mathem. 1966
- (45) J. Margarit y C. Buxadé: «Cálculo matricial de estructuras de barras». Blume 1970
- (46) O. C. Zienkiewicz y Y. K. Cheung: «The finite element method «Mc Graw Hill. 1967
- (47) C. A. Felippa: «Refined finite element analysis of linear and nonlinear bidimensional structures». Tesis doctoral. Berkeley. 1966
- (48) R. Courant: «Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations». Bull. Am. Math. Soc. 1943
- (49) J. L. Synge: «The hypercircle in mathematical physics». Cambridge U. P. 1957
- (50) J. L. Lions y E. Magenes: «Problèmes aux limites non homogènes et applications». Dunod 1968
- (51) G. Strang y G. J. Fix: «An analysis of the finite element method». Prentice 1973
- (52) C. A. Brebbia y J. J. Connor: «Fundamentals of finite element techniques». Butterworths 1973. Traducción española de E. Alarcón para Colegio I. C. C. P. 1975
- (53) K. Rektorys: «Variational methods in mathematics, science and engineering». Reidel 1975
- (54) P. M. Prenter: «Splines and variational methods». Wiley 1975
- (55) J. T. Oden y J. N. Reddy: «Variational methods in theoretical mechanics». Springer 1976
- (56) K. J. Bathe y E. L. Wilson: «Numerical methods in finite element analysis». Prentice 1976
- (57) J. Domínguez, C. Brebbia y E. Alarcón: «The boundary element method in elasticity». Int. Jour. of Mech. Sciences. 1978
- (58) C. Truesdell: «Rational continuum mechanics». Academic Press. 1977
- (59) L. E. Malvern: «Introduction to the mechanics of a continuous medium». Prentice 1969
- (60) M. E. Gurtin: «An introduction to continuum mechanics». Academic Press 1981
- (61) R. Abraham y J. E. Marsden: «Foundations of mechanics». Benjamin/Cummings 1966.
- (62) J. C. Simó y T.J.R. Huges “Computational inelasticity” Springer 1997.
- (63) J. M. T. Thompson y G. W. Hunt: «A general theory of elastic stability». Wiley 1973
- (64) J. Lemaitre y J. L. Chaboche. :”Mechanics of solid material”. Cambridge U. P. 1990
- (65) R. W. Hockney y J. W. Eastwood: «Computer simulation using particles». Mc. Graw 1981
- (66) P. A. Engel: «Structural analysis of printed circuit boards». Springer 1993
- (67) S. Utku: «Adaptive structures». CRC Press. 1998
- (68) D. J. Mead: «Passive Vibration Control”. Wiley 1999
- (69) D. E. Beskos y S. A. Anagnostopoulos: «Computer analysis and design of earthquake resistant structures «. Computational Mechanics. 1997

* * *