

ACADEMIA DE INGENIERÍA

**AFORISMOS ESTRUCTURALES
QUE PUEDEN SER DE UTILIDAD PARA COMPRENDER
DETERMINADOS COMPORTAMIENTOS DE
LOS SERES HUMANOS**

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO
EXCMO. SR. D. JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA
LEÍDO EN EL ACTO DE SU RECEPCIÓN PÚBLICA
EL DÍA 17 DE MARZO DE 1998

Y CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO
EXCMO. SR. D. JOSÉ LUIS DÍAZ FERNÁNDEZ



MADRID MCMXCVIII

Copyright © Academia de Ingeniería
Copyright © Javier Rui-Wamba Martija
Copyright © José Luis Díaz Fernández
Editado por la Academia de Ingeniería
Impreso en España
I.S.B.N.: 84-923406-1-4
Depósito Legal: M- 23.561-1998
1ª Edición, Junio 1998

AFORISMOS ESTRUCTURALES
QUE PUEDEN SER DE UTILIDAD PARA COMPRENDER
DETERMINADOS COMPORTAMIENTOS DE
LOS SERES HUMANOS

CONTENIDO

PRESENTACIÓN

7

DISCURSO DEL ACADÉMICO ELECTO EXCMO. SR.
D. JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA:

AFORISMOS ESTRUCTURALES QUE PUEDEN SER DE UTILIDAD
PARA EXPLICAR DETERMINADOS COMPORTAMIENTOS DE LOS
SERES HUMANOS

9

CONTESTACIÓN DEL ACADÉMICO EXCMO. SR.
D. JOSÉ LUIS DÍAZ FERNÁNDEZ

49

PRESENTACIÓN

VIVIMOS en un tiempo en que el esfuerzo innovador del ser humano nunca había sido tan intenso. La innovación es hoy absolutamente imprescindible para sostener unos niveles de desarrollo económico que permitan satisfacer las necesidades de una población creciente, sin afectar al bienestar de las generaciones futuras. En el centro de toda la prosperidad de una gran parte de la sociedad actual, se encuentra la Ciencia y Tecnología. La gran mayoría de las sociedades de los países más desarrollados reconocen el papel tan relevante que juega la Ciencia y Tecnología; sin embargo, en algunos ambientes se desconoce o no se establece la necesaria conexión entre ciencia y tecnología por una parte y desarrollo económico y social por otra. Tal es el caso de muchos segmentos de la sociedad española donde la cultura es estrictamente humanística y donde la cultura científica no ha existido nunca. El gran esfuerzo en desarrollo científico que nuestro país ha realizado en las últimas dos décadas para acercarse al nivel de los países más avanzados, tiene que verse reflejado también en la introducción de una componente científica y tecnológica en nuestra cultura, hasta ahora prácticamente ausente. Para ello es necesario que existan instituciones que promuevan esta idea con visión y liderazgo.

EN este contexto, debe contemplarse la reciente creación, en 1994, de la Academia de Ingeniería, la única Academia de ámbito nacional instituida bajo la monarquía del Rey Juan Carlos I y tras la Constitución de 1978. La Academia de Ingeniería se constituye a partir de un núcleo inicial de 36 miembros, propuestos por distintas instituciones: Instituto de la Ingeniería de España, Reales Academias a través del Instituto de España, Universidades, etc. Su composición final será de 60 miembros, que deben ser elegidos por los Académicos constituyentes.

LA redacción de Estatutos, Reglamento, etc., no frenó el deseo de incorporar, cuanto antes, a nuevos miembros a nuestra Academia. En el Boletín Oficial del Estado de 8 de Junio de 1996 se convocan las primeras

vacantes en un elaborado proceso que culminó en el primer acto público de toma de posesión del Académico Excmo. Sr. D. Javier Rui-Wamba Martija el 17 de Marzo de 1998, del que emana la presente obra.

EL Discurso del Académico Rui-Wamba y la respuesta del Académico Díaz Fernández que tengo el gusto de presentar, será un excelente ejemplo del acerbo cultural que atesora la ingeniería española. En pocos ámbitos de la ingeniería pueden confluir con tanta fuerza la imaginación y el rigor del cálculo como en la ingeniería civil, ámbito en el que la ingeniería española ha brillado especialmente. Los paralelismos que establece el Académico Rui-Wamba en su discurso, son una muestra de su habilidad para integrar a los ingenieros en la corriente cultural española, actividad a la que ha dedicado un gran esfuerzo nuestro compañero.

A este primer discurso que publica la Academia de Ingeniería le seguirán, sin duda, muchos otros con los que la Academia quiere contribuir a la promoción de la ingeniería en España.

ELÍAS FERERES CASTIEL

Presidente delegado de la Academia de Ingeniería

PREÁMBULO

Excelentísimo Sr. Presidente
Excelentísimos e ilustrísimos Señores
Señoras. Señores
Familiares, amigos y compañeros excelentísimos.

Buenas tardes. Gracias por haber venido.

Es un privilegio dirigirme a un auditorio en el que se perciben tantas sabidurías y tantos afectos.

El Discurso que he preparado –con el deseo y con la esperanza de que resulte digno de permanecer en su recuerdo–, es la síntesis de convicciones que han ido naciendo y sedimentándose a lo largo de toda mi vida profesional y que, para esta ocasión, he tratado de ordenarlas y enhebrarlas de forma que constituyan una cierta línea de pensamiento estructural.

No son ideas originales. He estado siempre rodeado de libros y los he utilizado profusamente. Los aforismos son, sin embargo, un texto escrito sin libros, aunque redactados teniendo en cuenta, consciente o inconscientemente, lo que está escrito en muchos de ellos.

No son conceptos abstractos. He procurado aplicarlos en todos mis trabajos profesionales.

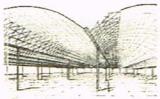
Son también manifestación de que los ingenieros, gentes de ciencias, evolucionamos hacia las letras. Porque aprendemos la importancia de la comunicación, vamos acumulando muchas lecturas inolvidables y, como percibimos que el tiempo es un bien escaso, nos afanamos por sintetizar conocimientos, por comprender el porqué de las cosas. Eso nos hace ser más de letras y un poco filósofos.

Tal vez, el texto y las imágenes que voy a presentar sean, además, el fruto de la semilla que dejó en mí la lectura juvenil del libro de Eduardo Torroja: *Razón y ser de los tipos estructurales*. Por ello, he tomado su última y expresiva frase como pórtico del Discurso.

EDUARDO TORROJA MIRET

RAZON Y SER

DE LOS TIPOS ESTRUCTURALES



Consejo Superior de Investigaciones Científicas

..."Lo que falta es, simplemente, la divulgación que atraiga el interés de las gentes que no se dedican a este género de trabajos y la conciencia, en el espíritu de los que la cultivan, de que esa comprensión exterior sería una ventaja para todos y, en especial, para ellos mismos."

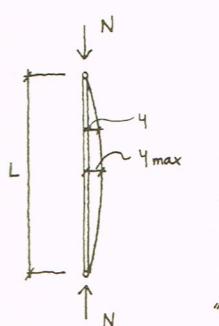
AFORISMO PRIMERO

La inestabilidad estructural tiene mucha similitud con la inestabilidad del comportamiento de los seres humanos.

Uno de los problemas más complejos en Ingeniería estructural y de mayor trascendencia práctica es el de la inestabilidad de elementos estructurales parcial o totalmente comprimidos.

Galileo, en su texto “*Dos nuevas ciencias*” editado en 1638, se ocupó de esta cuestión. Más de un siglo después, Leonard Euler publicó la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento de una barra recta comprimida.

Y por primera vez identificó el valor de la carga máxima, con la histórica expresión que conocemos como “la carga crítica de Euler”:



$$EIy'' = -Ny$$

$$N_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$



$$N_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

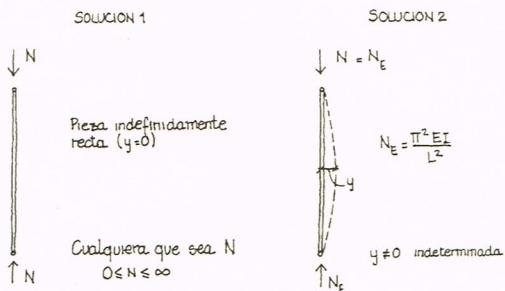
Euler 1707-1783

“*Methodus inveniendi lineas curvas...*” (1744)

Más adelante, Lagrange resolvió con generalidad la ecuación diferencial de Euler y demostró la existencia de dos soluciones posibles:

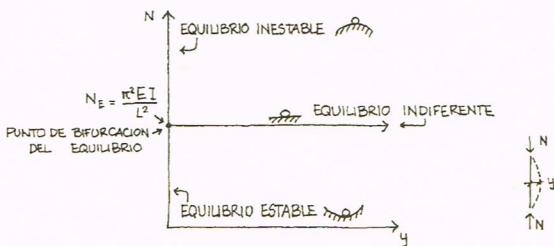
- una, en que la pieza comprimida permanece recta, cualquiera que sea el valor de N
- otra, en la que, alcanzado el valor crítico de Euler, la barra combará quedando indeterminada su deformación.

ECUACION DE EULER



La solución gráfica de la ecuación diferencial, muestra las tres formas posibles de equilibrio: estable, inestable e indiferente. La carga crítica de Euler señala el punto en el que, teóricamente, el equilibrio estable podría bifurcarse por la senda vertical del equilibrio inestable o por la horizontal del indiferente.

REPRESENTACION GRAFICA $EIy'' = -Ny$



Este comportamiento teórico de la barra comprimida no corresponde con la percepción que tenemos de lo que ocurre en la realidad.

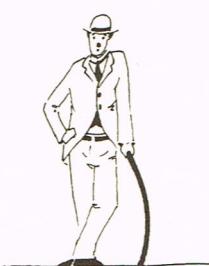
Recordemos, en efecto, la imagen entrañable de Charlot descargando una parte de su peso en su bastón. Según la teoría de Euler, el bastón permanecerá recto en tanto el peso del cómico no alcance el valor crítico y, sobre pasado éste, el bastón se combaría pudiendo ser cualquiera su geometría.

La realidad no es así. El bastón comenzará a combar en cuanto Charlot se apoye en él. Y la deformación será mayor cuando se incremente la carga.

PERCEPCION HUMANA DE LA INESTABILIDAD ESTRUCTURAL



PERCEPCION HUMANA DE LA INESTABILIDAD ESTRUCTURAL

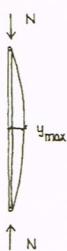


También podemos verificar con una tarjeta de visita, la inconsistencia del planteamiento de Euler. Percibimos que hay que ejercer un esfuerzo significativo para iniciar la combadura de la tarjeta, pero que, a continuación, ligeros incrementos de la presión que ejercemos con los dedos, incrementa notoriamente su deformación.

La incoherencia entre el comportamiento real y el teórico estriba en las hipótesis de que partió Euler: pieza comprimida perfectamente recta; carga, N , perfectamente centrada; material perfectamente elástico y pieza perfectamente distensionada. Se trataba de una pieza "ideal".

Ninguna de estas "perfecciones" son atributos de la pieza real. La geometría no será recta. La carga actuará con una excentricidad inevitable. El material no será elástico, y en la pieza analizada habitarán tensiones residuales autoequilibradas.

EXPLICACION DE LA INCOHERENCIA ENTRE COMPORTAMIENTO TEÓRICO Y REAL



$$EI y'' = -Ny$$

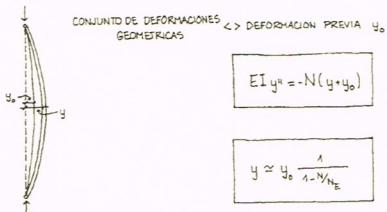
CONDICIONES IMPLÍCITAS

- pieza perfectamente recta
- carga N perfectamente centrada
- material perfectamente elástico
- pieza perfectamente distensionada

PLANTEAMIENTO DE EULER: PIEZA RECTA IDEAL

En la práctica profesional para analizar el comportamiento de la pieza real, solemos aceptar que el conjunto de las imperfecciones geométricas enunciadas equivalen a una deformación predeterminada.

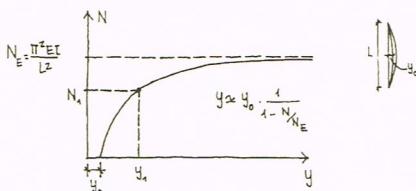
ANALISIS DE COMPORTAMIENTO DE LA PIEZA REAL



Centrándonos, a los efectos de este aforismo, en las imperfecciones geométricas exclusivamente, podemos plantear la *nueva ecuación diferencial* que gobierna el comportamiento de la pieza real, con una deformación previa equivalente, y_0 .

Su solución aproximada muestra cómo a cada valor de la carga N , corresponde un valor de la deformación, desapareciendo la irreal indiferencia de la pieza ideal.

REPRESENTACIÓN GRÁFICA $EI y'' = N(y + y_0)$



Este inevitable e imperfecto resumen del comportamiento del soporte comprimido, nos permite sacar consecuencias que nos ayudan a identificar similitudes con el comportamiento de los seres humanos.

1. *La perfección no existe y, en todo caso, sería indeseable por peligrosa.*

El ser humano, hipotéticamente perfecto, es aquel al que no parecen afectarle los problemas, las tensiones, las cargas de su vida diaria y es capaz de soportarlas sin manifestar el menor signo de debilidad. Y un día nos

enteramos de que el tal personaje ha tenido, inesperadamente, un comportamiento sorprendente. Que ha abandonado su máscara de perfección, porque ha alcanzado, sin avisar, su punto de bifurcación de equilibrio desplazándose por la rama de equilibrio indiferente, que en lenguaje coloquial se puede denominar la rama "pasota", sin que le preocupe su comportamiento ni la percepción que los demás puedan tener de él.

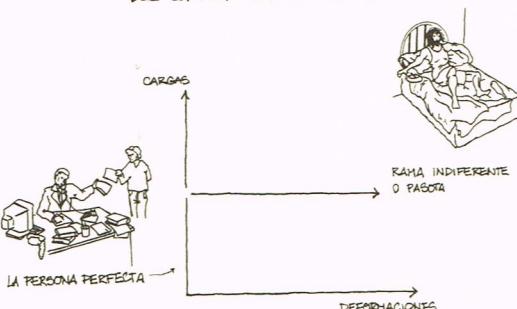
II. *Las imperfecciones son inevitables y deseables dentro de unos límites que en las estructuras acotamos en nuestros reglamentos, y en los seres humanos acota, explícita o implícitamente, la Sociedad.*

Si suponemos que el conjunto de imperfecciones de un ser humano puede, también, considerarse englobado en una deformación equivalente inicial, la carga que debe soportar produce que esta deformación inicial se amplifique. Cuanto mayor es la carga, mayor es la deformación.

Entre los seres humanos, los hay con una deformación inicial equivalente pequeña, que son capaces, por tanto, de soportar grandes cargas con pequeñas deformaciones. En el otro extremo están los que, en términos coloquiales, se suele decir que "hacen cansados", en los que cualquier carga por pequeña que sea se manifiesta con grandes deformaciones. Los primeros pueden ser peligrosos porque no avisar y colapsan bruscamente. Con los segundos no se puede contar demasiado.

LA SIMILITUD CON LA INESTABILIDAD

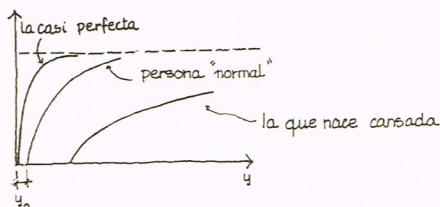
DEL COMPORTAMIENTO HUMANO



LA PERFECCION NO EXISTE Y EN TODO CASO
SERIA INDESEABLE POR PELIGROSA

Es delicado definir los límites de las imperfecciones socialmente admisibles, pero de hecho la Sociedad los pone aunque no sea posible objetivarlos. En todo caso, lo anterior debe entenderse como un elogio de la normalidad que cimenta las sociedades sanas.

LA SIMILITUD CON LA INESTABILIDAD
DEL COMPORTAMIENTO HUMANO



LA IMPERFECCIÓN ES INEVITABLE Y DESEABLE DENTRO DE UNOS LÍMITES

- III. La capacidad de un soporte comprimido se incrementa muy significativamente cuando se coloca un apoyo intermedio. La amistad es el apoyo que permite al ser humano incrementar su capacidad para soportar cargas.

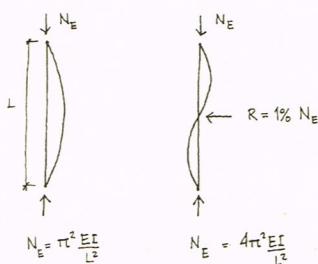
Recordemos la expresión general de la carga crítica de Euler:

$$N_E = n^2 \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

Cada valor de n representa una geometría de la defomada de la pieza pandeada, y a cada una corresponde un valor de la carga crítica.

ELOGIO DE LA AMISTAD

Carga crítica de Euler $N_E = n^2 \frac{\pi^2 EI}{L^2}$

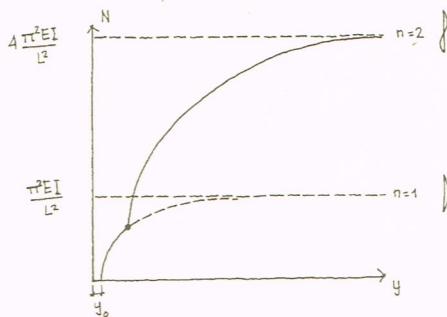


Para que la deformada tenga, por ejemplo, dos ondas, tenemos que conseguir que su desplazamiento en el centro sea nulo. Ello exige la presencia de un punto de apoyo, que impida la deformación transversal de la barra comprimida. Su reacción es del orden del 1% de la carga vertical que solicita a la barra.

Por tanto, un apoyo que genera una reacción muy pequeña multiplica por cuatro la capacidad de carga de la barra.

En el ser humano ocurre como en la barra comprimida. Un pequeño apoyo de una persona amiga, cuando las cargas que debemos soportar empiezan a ser excesivas, aumenta notablemente nuestra capacidad para soportarlas. El amigo que nos apoya no necesita hacer grandes esfuerzos, pero tiene que estar en contacto con nosotros para impedir que nos desplomemos. Por eso la amistad es y la sentimos tan importante. Sin ella soportaríamos mucho peor la vida y se acortaría el tiempo que podríamos vivir. Pero es cierto, también, que el apoyo del amigo requiere el contacto a través del que se genera la reacción que aumenta nuestra capacidad resistente. Y el contacto es comunicación entre personas. No hay apoyo si no hay comunicación, si no se puede transmitir la demanda de ayuda que se manifiesta por una deformación creciente consecuencia de nuestras imperfecciones.

EL APOYO DE LA AMISTAD



AFORISMO SEGUNDO

El conocimiento de las reacciones de los apoyos de una estructura es esencial para comprender su comportamiento y evaluar su seguridad.

Conviene recordar la más importante verdad estructural, que es una extensión de la tercera ley de Newton: la resultante de las acciones aplicadas en una estructura debe coincidir, en magnitud y posición, con la resultante de las reacciones de apoyo. Mucho tiempo antes, también Arquímedes había expresado un concepto similar:

LA MAS IMPORTANTE VERDAD ESTRUCTURAL

TERCERA LEY DE NEWTON

RESULTANTE DE ACCIONES = RESULTANTE DE REACCIONES

$$\Sigma P = \Sigma R$$

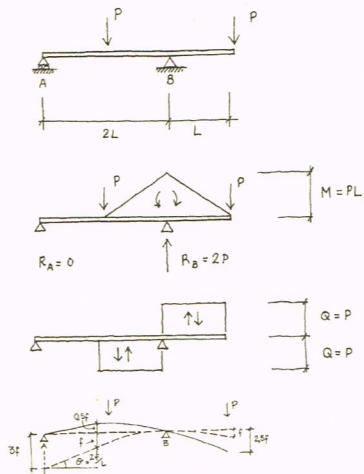


Isaac Newton
(1642 - 1727)

Hoy nos parece que la ley de Newton y el principio de Arquímedes, son verdades de Perogrullo, ese metafísico acreditado. Pero no está de más recordarlos, porque no siempre en la práctica profesional se tiene permanente conciencia de su necesidad cuando se concibe o dimensiona una estructura, ni se utiliza sistemáticamente como medio de comprensión de su comportamiento y como instrumento de control.

Consideremos el elemental ejemplo de una viga isostática, con una luz $2L$ entre apoyos y un vuelo de longitud L , con dos cargas, P , simétricas en relación con el apoyo central. Es evidente que la resultante de las dos cargas se sitúa sobre el apoyo B y que, por tanto, la reacción en este apoyo será $2P$ y nula en el otro.

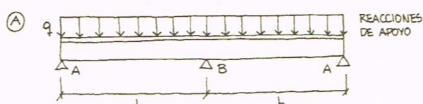
Conocidas las reacciones, son inequívocas las leyes de flectores y cortantes, y la deformada de la viga.



Este es un sencillísimo ejemplo. Propónganlo a estudiantes y a ingenieros. No es infrecuente que, de entrada, no observen lo obvio: que la resultante de las cargas debe coincidir con la resultante de las reacciones. Pídanles que dibujen la deformada y las leyes de esfuerzos. No serán raros los titubeos, y es de temer algún resultado equivocado debido a errores en los cálculos numéricos.

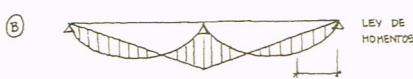
En el caso, también elemental, de un tablero continuo de un puente con dos vanos iguales, la continuidad supone una redistribución de los valores de las reacciones de apoyo, en relación con las que se producirían en tableros isostáticos. Conocidas las reacciones hiperestáticas, podremos determinar, con sencillez y fiabilidad, esfuerzos y deformaciones en la viga provocados por las cargas gravitatorias.

TABLERO MIXTO DE DOS VANOS Y SECCIÓN CONSTANTE CARGADO UNIFORMEMENTE

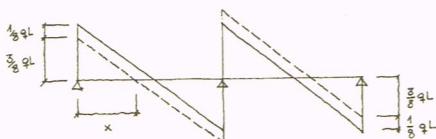


$$R_A = \frac{1}{2}qL - \frac{1}{8}qL = \frac{3}{8}qL$$

$$R_B = qL + \frac{2}{8}qL = \frac{5}{4}qL$$

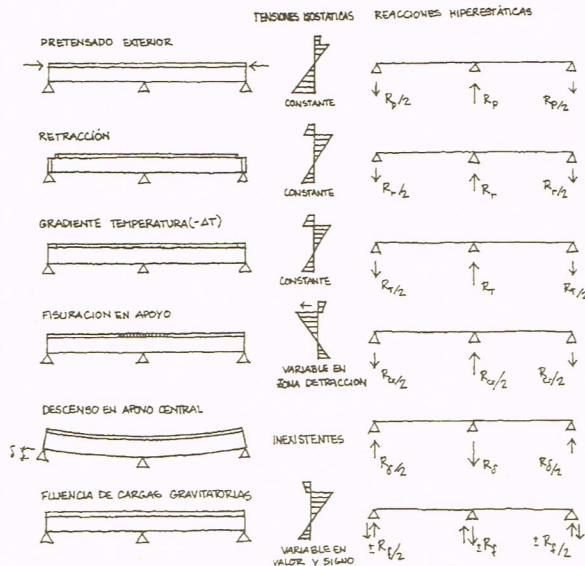


$$M_{\text{apoyo}} = M_{\text{isost}} - M_{\text{emp}} = 0 - \frac{1}{8}qL \cdot L = -\frac{qL^2}{8}$$



$$x = \frac{3}{8} \frac{qL}{q} = \frac{3}{8}L$$

$$M_x = \frac{3}{8}qL \cdot \frac{3}{8}L - \frac{q}{2} \left(\frac{3}{8}L \right)^2 = \frac{9qL^2}{128}$$



Pero, además, si planteamos el ejercicio con generalidad, tendremos que evaluar esfuerzos y deformaciones provocadas por:

- el pretensado exterior
- la retracción
- el gradiente de temperatura
- las fisuraciones en apoyo
- los asientos diferenciales
- la fluencia del hormigón.

Los efectos de cada una de estas acciones se traducen en la variación de las reacciones de apoyo, debido al hiperestatismo.

Conocidas las reacciones hiperestáticas, tendremos controlado el comportamiento de la viga y evaluada la influencia independiente de cada una de las acciones y su importancia relativa. Dispondremos, también, de datos imprescindibles para reflexionar sobre la forma en que influye su concomitancia.

Por ello, es un excelente hábito en todas las etapas de la concepción y del proyecto de una estructura, buscar y tener a la vista y en la mente las reacciones de apoyo.

Es cierto, sin embargo, que muchas de las dificultades e incertidumbres inherentes al hiperestatismo estructural, se evitarían concibiendo estructuras isostáticas. Tampoco, a este respecto, la comodidad es una buena consejera. Porque el hiperestatismo, más complejo e incierto de análisis, puede mejorar el comportamiento estructural: podríamos, en consecuencia, enunciar la paradoja del ingeniero:

“Cuando más hiperestática es una estructura peor conocemos su comportamiento, pero mayor es su seguridad”.

Niels Bohr nos enseñó, en casos como éste, a transformar la perplejidad en júbilo:

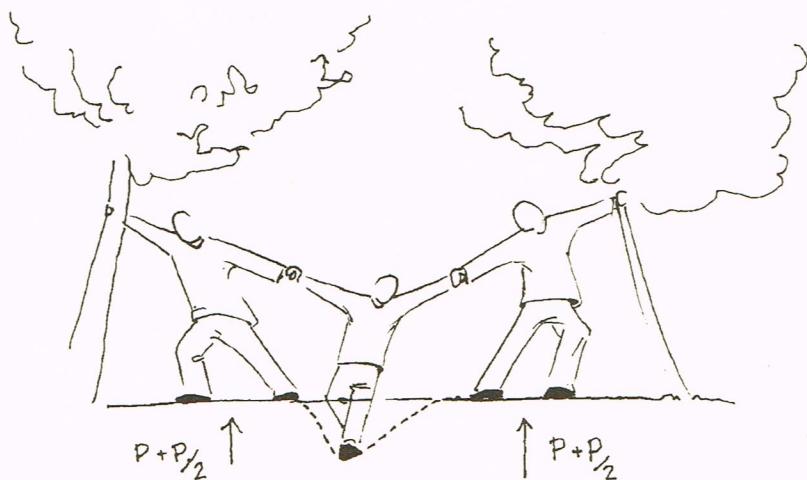
“Es magnífico, dijo, que hayamos dado con una paradoja. Ahora tenemos la esperanza de realizar progresos.”

También al ser humano se le pueden aplicar estas reflexiones. La vida es altamente hiperestática y son muchos los apoyos que nos procura el entorno familiar, de amistades y profesional que nos envuelve. Cada uno de nosotros es como una estructura con múltiples apoyos. Estamos sujetos a acciones exteriores que provocan reacciones en nuestros abundantes apoyos. Cuando cambia la magnitud de las acciones o se modifica su naturaleza, cambian las reacciones en los apoyos sobre los que estamos acomodados. Si alguno, entre ellos, presta menos su colaboración, parte o la totalidad de su reacción tiene que ser transferida a otros más eficientes o esforzados. Y es muy deseable saber en qué o quiénes nos estamos apoyando y en qué o quiénes nos podemos apoyar. Hay situaciones en la vida en las que flaqueamos. La fisuración de la viga a la que hemos hecho antes referencia, requiere, para evitar su colapso, transferir una parte de la reacción de apoyo en la zona fisurada, a otros apoyos más alejados. La fisuración conlleva redistribución de reacciones.

También el ser humano, para superar situaciones de este tipo, transfiere cargas de unos apoyos a aquellos con los que más puede contar. ¿Quién no recuerda, por ejemplo, situaciones de enfermedad en las que se ha revelado esencial el apoyo de algunos seres próximos?, ¿y quién no recuerda las dificultades a las que nos hemos tenido que enfrentar por no haber podido contar con los apoyos que teníamos por garantizados?

También un asiento del apoyo de una viga, exige la transferencia de las reacciones a los apoyos contiguos. Podemos expresarlo, en términos humanos, con la imagen de quien ha perdido pie en las arenas movedizas de la vida o en algún bache del camino, y es sujetado por quienes se encuentran a su lado.

Hemos recordado que existen en las estructuras otra serie de acciones más sutiles, como la retracción o la temperatura, que engendran estados internos de tensiones y modifican las reacciones de apoyo. Podrían equivaler en el ser humano a aquellas que nacen en nuestro interior por circunstancias ambientales, con frecuencia difíciles de identificar. Son las desazones o las euforias, en sus diversos grados, que al tratar de exteriorizarse, si están coaccionadas, provocan variaciones en nuestras reacciones de apoyo. Si pudiéramos medirlas, tendríamos datos objetivos de las causas que las han originado, de su trascendencia y, quizás, nos señalarían el modo más eficaz para superarlas o, al menos, para paliarlas.



AFORISMO TERCERO

La fatiga estructural depende, prioritariamente, de la amplitud y frecuencia de las variaciones tensionales.

El hermoso símbolo de la fatiga estructural, es el delta de sigma: $\Delta\sigma$

Séanos, pues, permitido inaugurar este espacio con un homenaje al alfabeto griego (redundante denominación), que almacena los símbolos que nos han acompañado en nuestro despertar estructural, que atesora la sabiduría sintetizada en tantas formulaciones estructurales, y cuya imagen aviva su recuerdo y nos facilita su comprensión.

EL ALFABETO

Alpha	A	α	Iota	I	ι	Rho	P	ρ
Beta	B	β	Kappa	K	κ	Sigma	Σ	σ
Gamma	Γ	γ	Lambda	Λ	λ	Tau	T	τ
Delta	Δ	δ	Mu	M	μ	Upsilon	Y	υ
Epsilon	E	ε	Nu	N	ν	Phi	Φ	ϕ
Zeta	Z	ζ	Xi	Ξ	ξ	Chi	X	χ
Eta	H	η	Omicron	O	\circ	Psiv	Ψ	ψ
Theta	Θ	θ	Pi	Π	π	Omega	Ω	ω

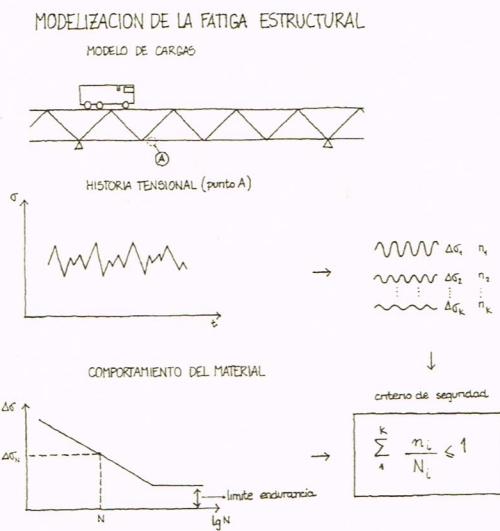
La Revolución Industrial nos trajo el maquinismo y, con él, el descubrimiento de la fatiga. Los accidentes ferroviarios por roturas de ejes, ruedas y carriles eran muy frecuentes. Seguin, Poncelet, Rankine, Wholer y tantos otros, fueron pioneros en el análisis de la fatiga estructural, que luego ha gestado innumerables estudios teóricos y experimentales buscando comprender y mitigar este complejo problema. Mucho es lo que se sabe, mucho lo que queda por saber y mucho lo que aún falta para poder llevar a la práctica diaria los conocimientos adquiridos.

Se sabe que son numerosos los factores que influyen en la fatiga:

- la calidad de los materiales
- la geometría de los detalles estructurales
- las tensiones residuales
- las características de las cargas
- la frecuencia con que se repiten
- el medio ambiente

Y se acepta que, entre ellos, los más determinantes y expresivos son la magnitud de las variaciones tensionales, $\Delta\sigma$, y el número de veces que solicitan a la estructura.

En síntesis, el procedimiento actual para evaluar la fatiga se articula como sigue:



- se establece un modelo de carga
- se emplea un procedimiento que transforma la historia tensional, en cada punto analizado, en un conjunto de variaciones armónicas de valor $\Delta\sigma$ que se repiten n veces;
- se dispone de modelos de comportamiento que permiten asignar a cada valor $\Delta\sigma$, un número máximo de ciclos.
- se acepta un modelo de fatiga acumulada como criterio de seguridad.

A pesar de la simplicidad del modelo, podemos presentir su lógica, por cuanto destaca la variación de tensión y las veces que se repite, como parámetros esenciales de la fatiga estructural. Porque es también la percepción que podemos tener de la fatiga en el ser humano.

La vida nos solicita e induce en nosotros un estado tensional que pasa prácticamente desapercibido cuando se mantiene constante. Es la variación de tensión lo que percibimos realmente y la que nos fatiga. Son, sobre todo, los cambios los que nos afectan, y la rapidez con que se producen, la frecuencia con que se van repitiendo, son factores determinantes en nuestro cansancio. En el deporte esto se percibe aún con más claridad. En una carrera de atletismo, en una competición ciclista, las aceleraciones y deceleraciones, los cambios de ritmos, producen un desgaste mayor en el organismo del atleta.

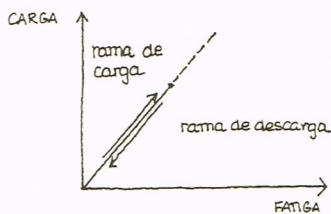
Para analizar el comportamiento de los atletas se hacen estudios de sensibilidad. Como en las estructuras, es dudosa la precisión de los modelos simplificados que se utilizan para analizar su comportamiento, en condiciones equivalentes a las de laboratorio. En la práctica de la competición, las condiciones ambientales son diferentes, la orografía también, y el cansancio del día se acumula al que se ha ido gestando en días precedentes. Porque en las personas, como en las estructuras, la fatiga se va acumulando.

Tenemos, quizás, los seres humanos como las estructuras, un depósito imaginario en el que vamos acumulando nuestro cansancio. Si fuésemos capaces de medir el nivel de llenado de este depósito, tendríamos una información de evidente interés. Aunque no pudiésemos aumentar su capacidad podríamos, desde la conciencia de nuestra fatiga acumulada, evitar situaciones de conflicto, poner –como en los viejos o maltrechos puentes– una señal de limitación de cargas sobre nuestro cuerpo y nuestro espíritu. Pero, además, enlazando con lo expuesto en los dos aforismos precedentes, nuestro depósito no está aislado. Está conectado con los de nuestro entorno y llega un momento en que el nivel de nuestra fatiga alcanza el aliviadero por el que se transfiere a otros depósitos amigos. Su obstrucción preludia dificultades y hay que preocuparse del mantenimiento del entramado de afectos para que la vida no nos fatigue demasiado.

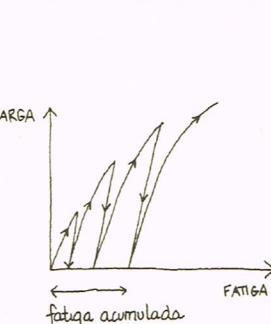
LA FATIGA ACUMULADA

COMPORTAMIENTO ELÁSTICO :

no hay fatiga



COMPORTAMIENTO REAL "IDEALIZADO"



Podríamos, por otra parte, esquematizar la imagen de la fatiga acumulada provocada por las cargas, en los gráficos siguientes

Supuestos comportamientos puramente elásticos, las ramas de descarga coinciden con las de carga, y la estructura o persona descargada volverá a la posición original sin que queden restos del esfuerzo. Es el material o la persona "ideal" que no se fatiga nunca. En los materiales y en las personas normales, la rama de descarga no nos devuelve al origen y perdura una fatiga, de la que se parte al volver a cargar, acumulando nuevas fatigas que se añaden a las anteriores hasta agotar nuestra capacidad. Los materiales y las personas "ideales" no recuerdan, y se puede decir, como contraste, que la fatiga, en los seres humanos, son los recuerdos que pesan.

Si las cosas son de esta manera, resulta evidente que cuanto mayor sean los esfuerzos que se realizan, mayor es la fatiga residual que queda. Y habría que preguntarse e investigar si, por ejemplo, los inhumanos esfuerzos de la alta competición no reducen la esperanza de vida de los que los realizan.

También cabría preguntarnos si la mayor longevidad media de la mujer no es manifestación de sabiduría adquirida por enfrentarse a la realidad con una serenidad que mitiga las variaciones de tensión y su frecuencia, frente a la agresividad del hombre que las amplifica.

José Saramago escribió el epitafio de este aforismo cuando, refiriéndose a un ave, nos recordó que "el corazón que vive poco late deprisa".

AFORISMO CUARTO

No es posible conocer el estado tensional de una estructura.

La cuestión que plantea este aforismo es particularmente importante, por cuanto una buena cantidad de estudios e investigaciones y una parte significativa del tiempo que, en la práctica, se consume en los cálculos estructurales, tienen por objetivo la determinación del estado tensional de la estructura analizada.

Hasta hace relativamente poco tiempo, todos los cálculos eran deterministas y se basaban en la "teoría de las tensiones admisibles". Se englobaban todas las incertidumbres de los modelos de cálculo en un único coeficiente, dicho de seguridad.

Poco a poco, allá por los años 40 (y quizás no sea casualidad que las nuevas actitudes al respecto coincidiesen con la derrota de algunos totalitarismos deterministas), los conceptos probabilistas se empezaron a abrir camino y los métodos de cálculo empezaron a evolucionar hacia el método de los "estados límites". La nueva metodología, venciendo hábitos y comodidades intelectuales, se fue incorporando a la enseñanza, a los códigos y, a través de ellos, a la práctica profesional. Ello, a su vez, contribuyó a una mayor reflexión, a un mejor conocimiento de las variables que influían en los comportamientos estructurales, y a la identificación de los diferentes objetivos que se persiguen al proyectar y construir una estructura.

TEORÍA DE LAS TENSIONES ADMISIBLES

$$\text{TENSION ADMISIBLE} \leq \frac{\text{LIMITE ELÁSTICO}}{\text{COEF. SEGURIDAD}}$$

$$\sigma_{adm} \leq \frac{\sigma_y}{k}$$

TEORÍA DE LOS ESTADOS LÍMITES

E.L. SERVICIO: FUNCIONALIDAD

E.L. ÚLTIMO: SEGURIDAD

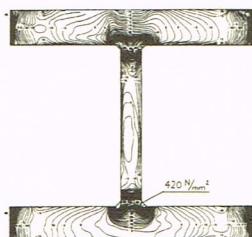
SOLICITACION MAYORADA \leq RESISTENCIA MINORADA

$$\gamma_s S \leq \frac{R}{\gamma_e}$$

Una de las consecuencias fue la conciencia, crecientemente extendida, de que el comportamiento de materiales y estructuras era más complejo que los supuestamente elásticos y lineales que, de ser ciertos, permitirían adivinar el porvenir. Se comenzó a poner en entredicho la bondad de los cálculos tensionales, que se venían utilizando como el centro de un universo sobre el que giraban todos nuestros desvelos estructurales. Los nuevos planteamientos llevaban incorporado el germen de la duda tensional.

Para alimentar la duda pongamos dos ejemplos característicos.

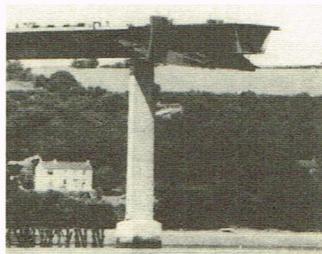
DIAGRAMA DE ISOTENSIONES RESIDUALES



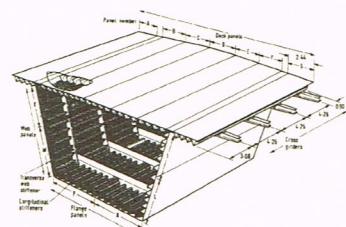
PERFIL LAMINADO WW 23 x 281 soldado

El gráfico representa las tensiones residuales de un perfil metálico soldado antes de ser cargado. Sus valores máximos alcanzan el límite elástico del material.

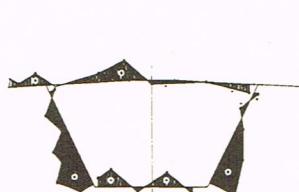
El otro ejemplo corresponde a las tensiones residuales medidas durante la cuidada fabricación, por soldadura, de dos secciones en cajón de un puente metálico en el Reino Unido.



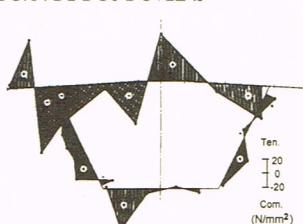
Puente en el Estuario de Cleddau (Milford Haven) REINO UNIDO



TENSIONES RESIDUALES PROVOCADAS
POR LA UNIÓN CON SOLDADURA DE DOS DOVELAS



Tensiones longitudinales



Tensiones transversales

En la figura de la izquierda se representan las tensiones longitudinales medidas. En la derecha, las transversales. Los valores tensionales y sus distribuciones son insospechables.

Ahora se puede comprender mejor la rotundidad del aforismo. Porque realmente no es posible conocer el estado tensional de una estructura. Lo que sí se puede conocer, dentro de unos márgenes razonables, son las variaciones tensionales inducidas por una carga determinada. Y este conocimiento, que no es un fin en sí mismo, puede ser un valioso instrumento para verificar el comportamiento estructural.

Los gráficos tensionales y deformacionales, como los que corresponden a un caso real, pueden considerarse como "mapas de riesgos" que aportan, al observador preparado, importante información sobre el comportamiento de la estructura analizada.

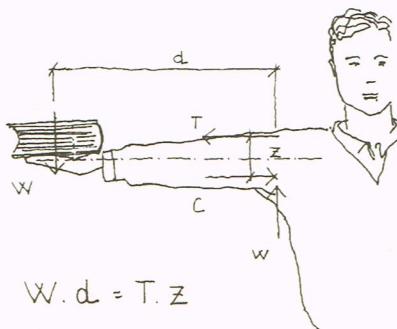


Tampoco es posible cuantificar las tensiones, físicas o psíquicas que acampan en el ser humano. No hay instrumentos científicos capaces de medirlas. Los análisis clínicos facilitan datos muy valiosos sobre el cuerpo humano, pero son manifiestamente insuficientes. Equivalen a los ensayos, químicos y mecánicos, que realizamos sobre muestras tomadas de nuestras estructuras.

Y, como en ellas, en el ser humano, la imposibilidad de conocer los estados tensionales debe orientar las estrategias para percibir, comprender y tratar de poner remedio a los males que nos aquejan o, en términos más positivos, para contribuir a nuestro bienestar.

Es, por ejemplo, mucho más sencillo y preciso determinar la capacidad que tiene una persona para sostener una carga en el extremo de su brazo extendido, que establecer las tensiones que se generan en los músculos y en los huesos. La flexión, en el extremo del brazo en contacto con el tronco, es resistida mediante una tracción en los músculos y una compresión que se transmite a través de la rótula del hueso. Y no está de más apuntar que la rotura del músculo en tracción es de carácter dúctil, porque va avisando –por un dolor creciente– que se está alcanzando el límite de su resistencia. Parece que la sabia naturaleza ha concebido al ser humano para que la capacidad de los músculos para transmitir tracciones, sea inferior a la de los huesos para hacerlo con las compresiones. Es a lo que aspiramos también en las estructuras. Que tengan comportamientos dúctiles y no frágiles y que, para ello, la rotura se produzca por agotamiento de los elementos traccionados antes de que lo hagan los comprimidos.

TENSIONES EN EL SER HUMANO



AFORISMO QUINTO

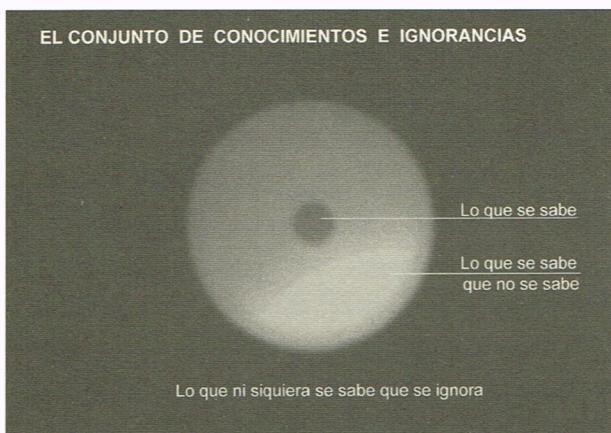
Los ingenieros somos gestores de incertidumbres.

Alguien, antes que ahora, ha definido la vida como el arte de tomar decisiones acertadas a partir de datos insuficientes. Nunca es suficiente el tiempo que tenemos para recopilar todos los datos disponibles, que nunca serán todos los que influyen. Tampoco disponemos de todos los conocimientos que serían necesarios, ni las circunstancias suelen propiciar el uso de todos los que, entre los que poseemos, pueden contribuir al acierto de las decisiones que tomamos.

Otro tanto ocurre en la ingeniería estructural. Escuchemos al respecto lo que se cita en un artículo publicado en 1991 en "New Scientist":

"La ingeniería estructural es el arte de modelizar materiales que no comprendemos del todo, en formas que no podemos analizar de un modo preciso, para soportar esfuerzos que no podemos evaluar adecuadamente, de manera que el público en general no tenga razón alguna para sospechar de la magnitud de nuestra ignorancia."

Toda una confesión de parte aderezada con unas generosas gotas de ironía que facilitan su digestión.

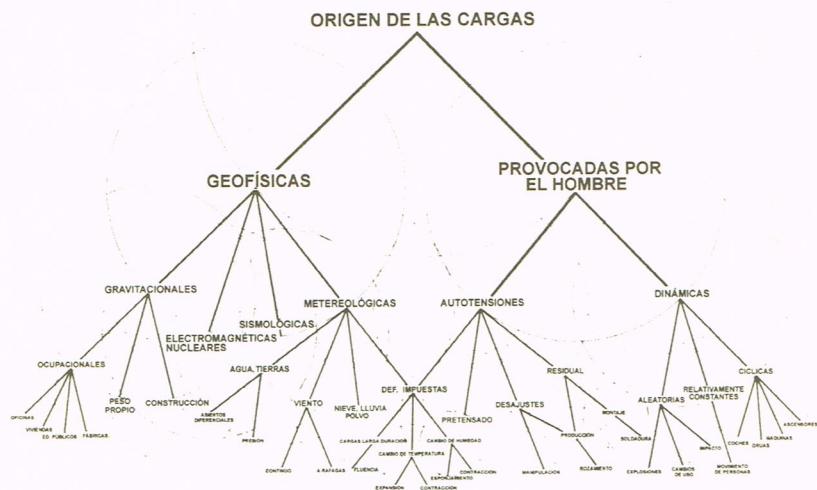


Máximo sintetizaba en una de las sabias viñetas que suele publicar en *El País*, las tres parcelas que engloban los conocimientos y las ignorancias de los seres humanos y, por tanto, de los ingenieros: la primera, de dimensiones finitas, sería la de los conocimientos que se tienen. En la segunda, mucho más extensa, estarían los que se sabe que no se tienen. Y en la tercera, que competiría en dimensiones con el Universo, los que ni siquiera se sabe que se ignoran.

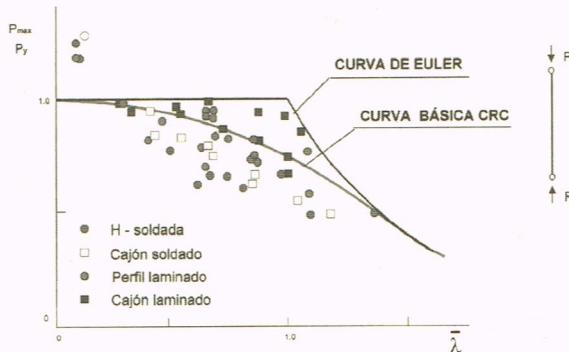
Es ley de vida y ley de la ingeniería también, que nuestras ignorancias sean infinitas y nuestros conocimientos limitados. Y la conciencia suele ser factor determinante para aumentar nuestros conocimientos a costa de nuestras ignorancias.

Seamos pues conscientes de las incertidumbres e ignorancias que nos envuelven, porque dicha conciencia, aunque no suele contribuir a nuestra felicidad, nos hace más humanos y puede favorecer el progreso.

Para ilustrar solamente un aspecto del mar de incertidumbres por el que debemos navegar, mostremos un gráfico panorama del origen de las cargas que actúan sobre nuestras estructuras.



Rescatemos también algunos resultados de ensayos de una de las estructuras aparentemente más sencilla de analizar: el soporte comprimido biarticulado, y observemos la nube de puntos que genera la dispersión de los resultados de ensayos reales.



R. Narayanan AXIALLY COMPRESSED STRUCTURES

Estamos muy lejos, por tanto, de la imagen determinista y dominadora que de la Ingeniería y del ingeniero tiene la Sociedad; supongo que, en buena medida, porque los propios ingenieros hemos contribuido a crearla. Pero siendo las cosas, a grandes rasgos, como han sido expuestas, no deja de ser cierto que son muchas y muy fundadas las causas para que *“el público en general no tenga razón alguna para sospechar sobre la amplitud de nuestra ignorancia.”*

Es cierto que con relativa frecuencia se producen accidentes. En general, no son consecuencia de nuestra ignorancia, sino de no haber puesto en práctica los conocimientos que tenemos o deberíamos tener.

La inmensa mayoría de las estructuras que somos capaces de construir con nuestros limitados conocimientos, cumplen espléndidamente su función, y resisten las cargas a que están sometidas y los avatares del tiempo. Sirva como muestra de esta orgullosa y justificada afirmación, la inequívoca imagen del Puente de San Francisco emergiendo entre nieblas, en este caso, meteorológicas.

Todo este lenguaje estructural resulta, creo yo, aplicable en el ser humano. Son inciertas las cargas que soportamos. Algunas las sentimos aunque nos estén ocultas a la vista. Todas varían con el tiempo, con el ambiente que nos rodea. Conocemos limitadamente los materiales con los que estamos constituidos, y mucho menos los espacios inmateriales que llenan el vacío entre aquéllos y que quizás sea lo que llamamos espíritu. Podemos razonablemente estimar la respuesta a las cargas que físicamente

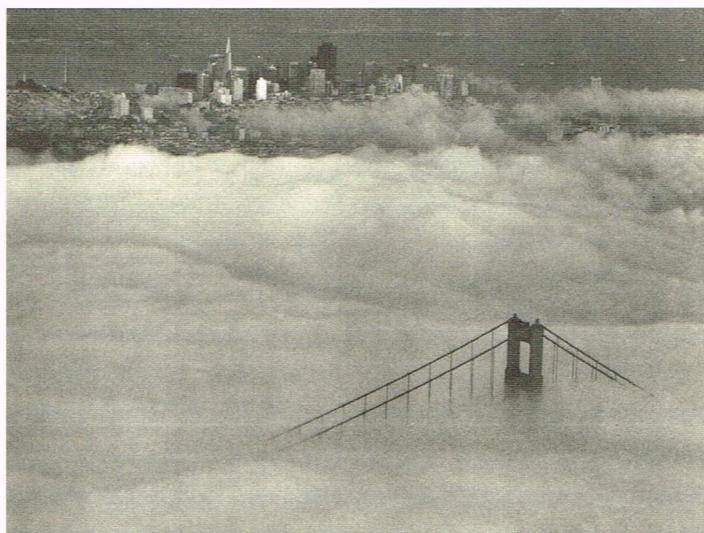
nos solicitan y son mucho más inciertas las respuestas a las acciones que nos commueven. El ser humano también es un gestor de incertidumbres y, como en las estructuras, los ingredientes para una eficaz gestión son:

- Consciencia de las incertidumbres
- Conocimientos
- Marco adecuado para aplicar los conocimientos
- Mayoración de solicitudes desfavorables
- Minoración de la capacidad de respuesta

También los seres humanos nos preocupamos por nuestra "funcionalidad" y por nuestra "seguridad". El escrutinio periódico de nuestra salud es uno de los modos con que gestionamos nuestras incertidumbres. En cuanto al "método de los estados límite últimos", el mundo de los seguros o de los planes de pensiones son un ejemplo de aplicación diaria.

Aunque más allá de coeficientes de seguridad, de técnicas de control, de modelos más o menos sofisticados de cálculo estructural o actuarial, hay otros instrumentos que utilizamos en la gestión eficaz de las incertidumbres, como veremos a continuación.

Pero dejemos a Juan Benet la última palabra de este aforismo, al que tal vez se estaba refiriendo cuando escribió que "un pueblo cobarde, egoísta y soez prefiere siempre la represión a la incertidumbre".



AFORISMO SEXTO

Los materiales y las estructuras que construimos con ellos deben ser resistentes, dúctiles y tenaces. La ductilidad es un puente sobre nuestra ignorancia y la tenacidad estructural expresa su tolerancia al daño.

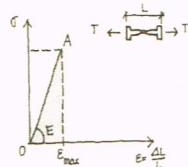
También el ser humano tiene que ser resistente, dúctil y tenaz. No se requiere sin embargo que sea dócil o maleable.

La necesidad de resistir a las acciones a las que estamos sometidos, es la que mejor comprendemos. Parece que hubiésemos nacido con el teorema de Newton genéticamente instalado.

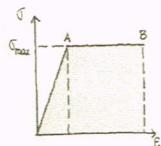
La ductilidad es un concepto enjundioso que goza de pública aceptación, aunque no siempre se comprende su significado profundo. Porque, también, es muy valorada la elasticidad, lo que es, en cierto modo, contradictorio.

LA IMAGEN DE LA ELASTICIDAD Y DE LA DUCTILIDAD

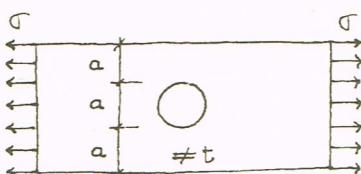
EL VIDRIO ELÁSTICO



EL DUCTIL ACERO

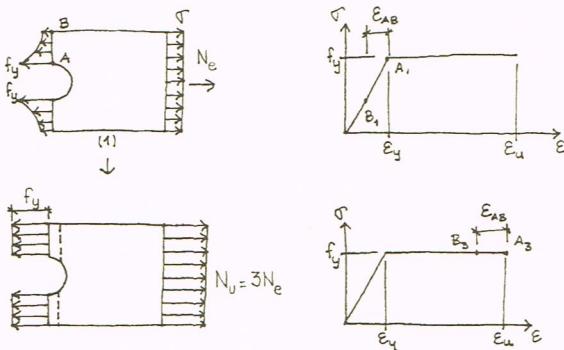


ENSAYO DE UNA PROBETA EN TRACCION



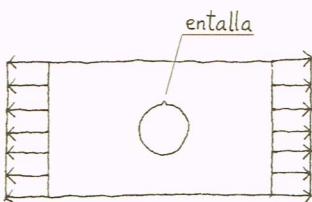
La imagen característica de ambos conceptos se muestra en los gráficos tensiones - deformaciones del vidrio, material esencialmente elástico y frágil, y del dúctil acero. El trabajo necesario para romper una u otra probeta está representado por las áreas sombreadas en la imagen, lo que es un índice muy expresivo del diferente comportamiento entre los dos materiales.

Analicemos ahora el comportamiento de una típica probeta de acero con un agujero en el centro, solicitada a tracción.



En un momento determinado, en el borde del agujero de la sección crítica, se alcanzaría el límite elástico. La distribución de tensiones no sería uniforme. Si el material es y se comporta dúctilmente, podremos aumentar la carga tres veces más hasta que rompa, siendo la distribución tensional, en la sección crítica, uniforme e igual al límite elástico. Por tanto, la carga de rotura no está influida por la forma en que se distribuyen las tensiones en etapas intermedias del proceso. No necesitamos, pues, conocer el estado tensional de la probeta solicitada por una carga y por eso se puede decir que "la ductilidad es un puente sobre nuestra ignorancia". Pero en las estructuras, como en los seres humanos, esto no significa que siendo dúctiles no importa que seamos ignorantes y que podemos manifestar impunemente nuestras ignorancias sin que ello tenga consecuencias. No es así. La ductilidad es un capital humano, como lo es estructural, que hay que administrar con suma atención. Cada vez que lo utilizamos para saltar sobre las consecuencias de nuestra ignorancia, consumimos una parte de este capital y más cuanto mayor sea el desatino cometido. Se suele decir que una manera de ocultar nuestra ignorancia es no superar sus límites. Pero esto sería no vivir. Vivir la vida es cometer errores y el ser humano tiene el derecho a equivocarse. En el trabajo sólo se equivoca el que trabaja y en la vida sólo se equivoca el que la vive. Naturalmente esto no justifica todos los errores y, por el contrario, exige que se pongan todos los medios para evitarlos, porque el tratar de hacerlo es la forma más eficiente de administrar nuestro capital de ductilidad y evitar la muerte por ignorancia acumulada.

Supongamos ahora que provocamos una pequeñísima entalla en el eje del agujero de la probeta dúctil.



fondo de ésta alcanzarán su límite para valores muy bajos de la carga. Se produciría un principio de rasgado que aumentaría progresiva y rápidamente hasta romper la probeta, para una carga muy reducida.

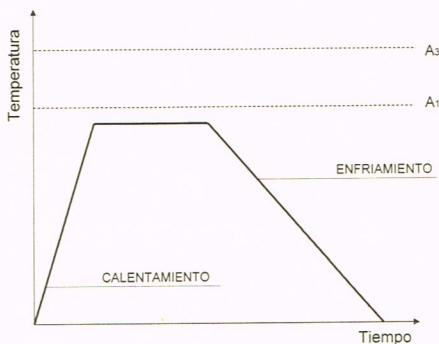
La tenacidad expresa, por tanto, la tolerancia al daño e identifica la máxima profundidad de la fisura que, en unas condiciones determinadas puede tolerar la probeta, sin que su comportamiento dúctil se vea prácticamente afectado.

También en el ser humano la tolerancia al daño es imprescindible para vivir y, por eso, la tenacidad es cualidad aún más importante que la resistencia o la ductilidad. Porque, en efecto, las enfermedades que anulan nuestras defensas, que incapacitan nuestro sistema inmunológico son mortales, y la batalla por la vida, en caso de padecer una de estas enfermedades, consiste en recuperar la tenacidad. En tanto no se consiga, quien la padece debe estar encapsulado en un ambiente aséptico que lo aíslle de los virus de todo tipo que conviven con nosotros, y de cuyos daños estamos preservados por la coraza de la tenacidad, que la ciencia nos ayuda a preservar y reforzar.

Nos hemos referido a lo que podríamos llamar tenacidad biológica, que debe tanto a la Ciencia. Pero, también, tenemos necesidad de ser tenaces psíquicamente, de tolerar daños que no se manifiestan física o químicamente. Es lo que nos impide derrumbarnos al primer contratiempo, soportar puntas de tensiones sin que seamos conscientes de qué las provoca y por qué se perciben con diferente intensidad por unas u otras personas. La hipersensibilidad de algunos seres humanos debe ser manifestación de la existencia de concentradores de tensiones, de fisuras, en nuestro organismo. La incapacidad de la Ciencia para abordar estos problemas atrae toda clase de remedios, desde los que son profundamente respetables a los que son grotescamente irrelevantes. Entre los primeros, las técnicas terapéuticas de la psicología podrían ser como el masaje del alma.

Si el material es tenaz, la probeta rompería sin merma de su capacidad resistente.

Si no fuese suficientemente tenaz, no toleraría el daño provocado por la entalla. Las puntas de tensiones en el



Y lo digo para traer a colación que la tenacidad muscular se preserva y se mejora con masajes que consisten, por ejemplo, en el golpeteo a ritmo rápido sobre los músculos, para desentumecerlos, aliviando las tensiones superficiales. El equivalente estructural es el *shot peening*, procedimiento relativamente moderno que consiste en golpear sistemáticamente con pequeñas bolas de acero sobre la superficie del metal que se desea distensionar. El impacto de una bola crea compresiones transversales en la superficie golpeada y la suma de las producidas por todos los impactos contrarresta las tracciones superficiales y "tonifica" la estructura, como el masaje corporal lo hace con quien lo disfruta.

Y es éste, también, lugar adecuado para recordar que en las estructuras metálicas de envergadura, se recomienda y en ocasiones se exigen tratamientos térmicos que consisten en someter a la zona en tratamiento a una elevación controlada de temperatura, mantenerla a un nivel determinado y proceder después a su enfriamiento. Según la rapidez de calentamiento, la temperatura alcanzada, el tiempo que se mantiene y la velocidad de enfriamiento, se tienen diferentes resultados. Así con el recocido se consigue reducir tensiones y mejorar la ductilidad. Cuando la temperatura que se alcanza es mayor y el enfriamiento es brusco, se está templando el acero, dotándolo de gran dureza superficial, pero disminuyendo su ductilidad.

En el ser humano, la sauna sería el equivalente al proceso de recocido y, efectivamente, sirve para aliviar tensiones. El uso sistemático de la ducha fría al levantarse equivale al templado, y conviene tomar alguna precaución para evitar que una mejora en el temple lo sea a costa de otras cualidades.

AFORISMO SÉPTIMO

No se debe calcular una estructura que no se sepa dibujar. No se deben utilizar fórmulas cuyo significado físico se desconoce. No se debe dimensionar con ordenador una estructura que no se sepa calcular manualmente.

En todas las etapas del proceso que conducen a la gestación de una estructura, la conciencia de lo que en cada momento estamos haciendo es el factor determinante para lograr estructuras sanas y seguras. Porque son los conocimientos el mejor ingrediente en la gestión de las incertidumbres. Por ello conviene advertir de los peligros de una enfermedad *la calculitis*, altamente contagiosa, cuyo síntoma esencial es confundir el proyecto de una estructura con su cálculo y situar éste como la finalidad del trabajo ingenieril y no como un medio.

Entre los condimentos de un antídoto contra esta enfermedad, que de extenderse abortaría toda posibilidad de progreso en la ingeniería estructural, se encuentran los tres que enuncia el aforismo que encabeza esta reflexión:

- Dibujar la estructura antes de calcularla
- Comprender el significado físico de las fórmulas empleadas
- Hacer un cálculo manual aproximado de la estructura

Son perogrulladas. Si la misión de una estructura es transmitir unas cargas al suelo, comprender y visualizar cuáles son los caminos que tiene que seguir para lograrlo, parece imprescindible. Y para ello nada mejor que dibujar la estructura y hacerlo a una escala conveniente para que salte a la vista, a una vista ingenierilmente educada, que el recorrido de las cargas es posible, que los recodos tienen sobreanchos suficientes y los cruces de caminos permiten ordenar el tráfico tensional sin conflictos insuperables. Más de una estructura “ortopédica” podría haberse evitado si sus responsables hubiesen seguido este consejo.

Contengamos ahora unos instantes el aliento para recibir a la utilidad, la sabiduría y la belleza que resplandecen en algunas fórmulas, que son patrimonio de la humanidad.



Johannes Kepler
(1571-1630)

La tercera ley de Kepler:

$$P^2 = a^3$$



Isaac Newton
(1642-1727)

La ley de la gravitación universal y el segundo principio de Newton.

$$F = G \left[\frac{m_1 m_2}{r^2} \right]$$

$$F = ma$$



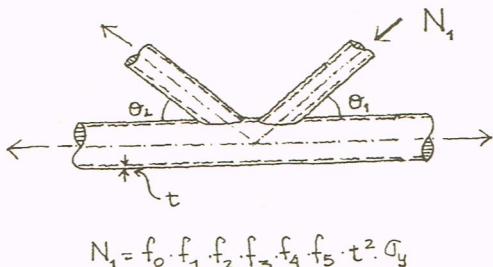
Albert Einstein
(1879-1955)

La ley de la relatividad de Einstein:

$$E = m c^2$$

Pongamos como contraste una fórmula de las que, con preocupante frecuencia, aparece en el panorama estructural: pretende definir la capacidad de transmitir una carga, N , por la diagonal de una celosía construida con tubos.

Es el tipo de fórmula pensada para ser programada y no para ser comprendida. Aparentemente su aplicación está al alcance de cualquiera, sea ingeniero o no. Y el que la aplique, ingeniero o no, tendrá que tener una fe ilimitada (¿podría tratarse de una fórmula religiosa?) en que, efectivamente, cuantifique acertadamente la capacidad del nudo para transmitir unas cargas determinadas. Y como corolario, el ingeniero se tiene



siendo:

$$f_0 = 2,11 (1 + 5,66 \beta_1)$$

$$f_1 = (2 \beta)^{0,209}$$

$$f_2 = 1 + \frac{0,00904 (2 \beta)^{1,24}}{\exp(0,508 \beta_1 - 1,55) + 1}$$

$$f_3 = (1 - 0,376 \cos^2 \theta_1) / \operatorname{sen} \theta_1$$

$$f_4 = 1 + 0,305 \beta_1 - 0,285 \beta_1^2$$

$$f_5 = (G_y / G_u)^{-0,723}$$

que empeñar en proyectar su estructura para que los nudos que resulten sean algunos de los que disponen de fórmulas para su evaluación. Imaginemos, por otra parte, que la ley de la relatividad apareciese impresa como:

$$E = m^2 c$$

Inmediatamente, nos daríamos cuenta de que existe un error. Pensemos ahora que en la fórmula de la capacidad resistente del nudo se hubiese deslizado también un error de imprenta. Sería imposible de detectar.

En otro orden de cosas, suele ser frecuente encontrarnos con notas de cálculo realizadas con ordenador, de tal extensión que desestimula, cuando menos, el análisis de los resultados y dificulta alcanzar una idea clara del comportamiento de la estructura. Se produce una indigestión de números. Suele haber mucho cálculo, poco análisis y escaso control de resultados. Y podemos preguntarnos, parafraseando una expresión célebre, si "los cálculos no sirven para ocultar el pensamiento".

No se trata, ni mucho menos, de renunciar a un instrumento indispensable como son los cálculos mecanizados, sino de recordar en voz alta que deben ser utilizados por manos expertas que sepan lo que buscan, conozcan las posibilidades y las limitaciones de los programas que vayan a utilizar, establezcan con claridad la modelización de materiales y estructuras, y que sean capaces de preparar síntesis claras de los resultados, para poder contrastarlos con los que, previamente, se habrán estimado con modelos simples pero efectivos.

¿Y qué tiene todo esto que ver con el comportamiento de los seres humanos?. Pues más de lo que podría parecer a primera vista, porque en

el fondo de la cuestión está el problema de la confusión entre información y conocimiento, y el problema también del modo de filtrar las oleadas de información indiscriminada que nos llegan, para digerir lo esencial y poder utilizarlo y transmitirlo.

El ser humano debe ser capaz de “dibujar”, de percibir con claridad el entramado en el que está asentado y, haciéndolo, identificará anomalías, singularidades, “cuellos de botella” en el itinerario que deben recorrer las cargas materiales o espirituales a las que está siendo sometido, hasta disiparlas por los cimientos en los que apoya.

Y el ser humano no debe tampoco utilizar fórmulas cuyo significado no comprende para evitar, por ejemplo, que la parafernalia informativa que con frecuencia nos bombardea, anule nuestra capacidad de pensar, ni las posibilidades de escrutinio que nos brindan nuestras sensibilidades y conocimientos.

Y conviene también que cuando emprendamos cualquier iniciativa, tengamos una idea previa de los resultados que debemos alcanzar e ir contrastándolos a medida que se producen, para –en caso de discrepancias– rectificar el camino emprendido. En el ser humano, como en las estructuras, el coste de los errores u omisiones suele ser tanto mayor cuanto más tardemos en darnos cuenta de haberlos cometido.

AFORISMO OCTAVO Y ÚLTIMO

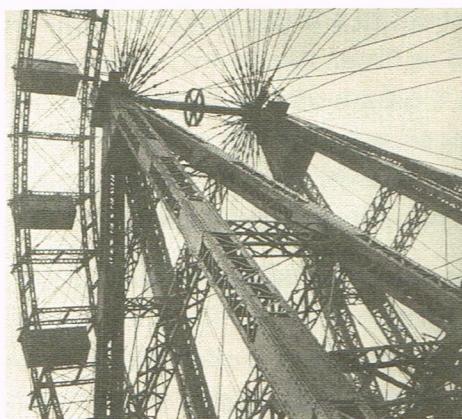
Las patologías estructurales son el modo en que nuestras estructuras manifiestan su disgusto por el trato que han recibido en su concepción, proyecto, construcción o utilización.

Las fisuraciones incontroladas, los excesos de flechas, las vibraciones intolerables, los envejecimientos prematuros, los colapsos parciales o generales, son consecuencia de falta de atención, conocimientos insuficientes, escasez de tiempo, problemas en la comunicación, organizaciones inadecuadas, precios desestimulantes, cambios precipitados, falta de profesionalidad y condicionantes que han pasado desapercibidos. Ortega ya observó al respecto que: *"la realidad ignorada prepara siempre su venganza."*



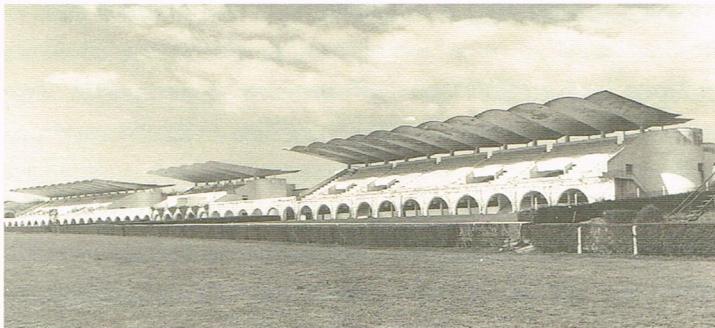
Mostramos, ahora, una dolorosa imagen de estructura maltratada.

El pabellón de los Descubrimientos



Pongamos como contraste la imagen feliz de estructuras bien tratadas: la noria del Prater vienes; la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela.

La Noria del Prater. Viena



Eduardo Torroja. Tribuna del Hipódromo de la Zarzuela. Madrid

Entre las formas de patología estructural que son manifestación de mal trato, está su aspecto exterior, su imagen visual. No se trata de crear una obra de arte cada vez que construimos una estructura, pero sí podemos estar seguros de que cuando todo el proceso de concepción, proyecto y construcción ha estado en manos competentes y sensibles, el resultado tendrá dignidad visual y bastará con una mirada a la obra concluida para comprender que ha sido bien tratada.

Por el contrario, hay otras estructuras que cuando cruzamos nuestra mirada con la suya, nos informan de su malestar. El análisis visual de la estructura, primero en los planos, luego durante la construcción y finalmente cuando ya está concluida, nos ofrece mucha e indispensable información.

Cuántos accidentes se podrían haber evitado si hubiéramos hecho caso de los mensajes que nos envía la estructura, a la que irrita por encima de todo la desidia que supone que no se hayan utilizado los conocimientos que tenemos a nuestra disposición. Y cuántos más son los accidentes que se han evitado por hacer caso de los presagios con que se comunican con nosotros las construcciones. Y cuánto aprenderíamos si fuésemos capaces de ponernos en el lugar de la estructura y sentir como ella siente.

Una de las consecuencias que se deriva de la reflexión anterior es que, cuando se oculta una estructura, se ciegan los flujos de información que nos puede facilitar su observación visual. No siempre se pueden dejar a la vista pero, en todo caso, antes de amortajarla hay que asegurarse que hemos obtenido toda la información contenida en su aura estructural.

También se puede decir que muchas de las patologías en el ser humano pueden ser consecuencias de los malos tratos, físicos o psíquicos, que ha sufrido durante su gestación o en el transcurso de su vida. Algunos son autoprovocados, como es el caso de los fumadores que maltratan su cuerpo, o de los excesos de tantos tipos que hacemos padecer a nuestro organismo. Aunque también la obsesión contra los excesos es una forma de patología.

El ser humano, como las estructuras, está manifestando continuamente en sus gestos y con su imagen, sus insatisfacciones; lanzando avisos, demandando ayuda y, al tiempo, aportando síntomas acerca de las causas que las producen.

La serenidad, el equilibrio, la alegría y la autoestima se expresan con toda claridad y, además, tienen la virtud de ser, en cierto modo contagiosas. Por el contrario, la imagen de fatiga, desaliento, tristeza, dolor, son síntomas de patologías cuyas causas podrían ser percibidas. Por eso, como en las estructuras, la observación del ser humano es un caudal valiosísimo de información.

El recurso a maquillajes físicos, químicos o psíquicos, pretende ocultar información a los demás y a nosotros mismos. Los carnavales duran un tiempo limitado y no podemos, ni en las estructuras ni en los seres humanos, enmascarar permanentemente nuestras patologías. Si no se pone remedio, acaban desenmascarándonos.

COLOFÓN

Concluye aquí la síntesis de los pensamientos que he querido compartir con Uds. Y ahora, en el crepúsculo de mi intervención, permítanme que invite a estar con nosotros a cuatro ingenieros, que creo, quizás confundiendo el deseo con la realidad, me han influido.

- Juan Benet Goitia, que se tenía por un ingeniero que escribía.
- Carlos Fernández Casado, a quien Juan Benet describió, hacia 1977, como uno de los más devotos, apasionados, honrados, innovadores y esmerados ingenieros.
- Eduardo Torroja, el más universal y prestigioso de los nuestros. Por sus méritos como Ingeniero, se le distinguió con el título de Marqués. Entonces no existía Academia de Ingeniería.
- Eugene Freyssinet, que, con la invención del hormigón pretensado, alumbró una auténtica revolución en el arte de construir.

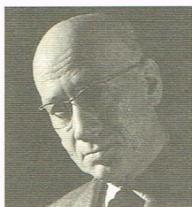
Los cuatro, desde la atalaya de la eternidad, son testigos de mi agradecimiento para todos los que me habéis brindado vuestro apoyo. Numerosos sois los que estáis aquí presentes. Otros comparten atalaya con nuestros cuatro ingenieros. A todos os tengo ahora presentes. Sé que vuestra generosidad me exime del deber de citar vuestros nombres.



Juan Benet
(1927-1993)



Carlos Fernández Casado
(1905-1988)



Eduardo Torroja
(1899-1961)



Eugene Freyssinet
(1879-1962)

Debo también profundo agradecimiento a todos Uds. Presiento que serán tolerantes con las imperfecciones de mi Discurso y deseo, fervientemente, que consideren acertada la decisión que tomaron, a partir de datos insuficientes, de venir a escucharme. Porque, de ser así, se habrán ejercitado Uds. en el arte de vivir y yo podré recordar, ya para siempre, que me he estado dirigiendo a un auditorio de artistas.

Así concluye cuanto tenía por mostrar y por decir.
Mostrado y dicho queda.

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA

CONTESTACIÓN

Excelentísimo Sr. Presidente
Excelentísimos e Ilustrísimos Señores
Señoras y Señores

ME cabe el honor de dar la bienvenida, en nombre de la Academia de Ingeniería, al nuevo Académico de Número, D. Javier Rui- Wamba y lo hago con la satisfacción que me produce acoger a una personalidad que reúne singulares cualidades en campos tan diversos como la docencia, la creatividad, la iniciativa empresarial y el humanismo.

NACIDO en Guernica, cursó el bachillerato en el Colegio de los Jesuitas de Bilbao y los estudios de Ingeniero de Caminos en Madrid, finalizados en 1966 a los 23 años. Después de trabajar durante dos años en la construcción de los puentes del Plan Sur de Valencia y otro año más en París, como Ingeniero de Europe- Etudes, a los 27 años tuvo la valiente iniciativa de crear su propia empresa, ESTEYCO, en permanente expansión desde su creación y cuyas actividades abarcan muchas de las ramas de la Ingeniería Civil y de la Arquitectura.

A partir de 1975 y durante 17 años, fue profesor de Estructuras y Puentes Metálicos de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid, aportando su visión personal de la enseñanza, que comentaré más tarde.

En 1991 creó la Fundación ESTEYCO, con la finalidad de contribuir al progreso de la ingeniería y la arquitectura en España. Para definir la personalidad de Rui-Wamba, son significativos algunos párrafos del prólogo de los libros publicados por dicha Fundación: "Reivindiquemos un espacio cualitativamente destacado de la ingeniería en la sociedad e impulsemos la evolución de la imperante cultura del hacer hacia la cultura del hacer pensando". "Valoremos nuestra independencia, no como un arma contra

nadie, sino fundamentalmente como un atributo intelectual inherente a quienes tienen por oficio pensar, informar y decidir libremente".

Es miembro de Comités Científicos de varios países y organizaciones internacionales, autor de numerosas publicaciones y ha impartido cursos y conferencias en varias instituciones españolas y extranjeras.

DESPUÉS de esta breve síntesis biográfica, permítanme que desarrolle algo más extensamente los tres aspectos nucleares de su personalidad: su visión de la enseñanza, las realizaciones profesionales más destacadas y algunas de las actividades de la Fundación que ha creado y que preside.

En lo que se refiere a la enseñanza, Javier Rui-Wamba establece una diferencia entre lo que realmente se hace: ser entrenado para aplicar automáticamente gestos o métodos, y lo que debería hacerse, que es hacer comprender lo esencial para luego aplicar esos conocimientos adquiridos a un amplio campo de problemas. Como síntesis de su concepción de la enseñanza, Rui-Wamba menciona con frecuencia el libro emblemático de Eduardo Torroja "Razón y ser de los tipos estructurales", en el que se realiza un estudio profundo del comportamiento de las estructuras, sin utilizar fórmulas.

También destaca Rui-Wamba en sus escritos el distanciamiento entre investigación, enseñanza y práctica profesional. En su valoración, se investiga sobre lo que se sabe bastante y no sobre lo que sabe muy poco, se enseña lo que el profesor sabe y tiene preparado para enseñar y se practica utilizando al máximo códigos o reglamentos que evitan pensar y que convierten al profesional en un autómata.

Por último, dentro del apartado de la enseñanza, destaca Rui-Wamba uno de los defectos de la formación técnica: los alumnos deben resolver un problema cuyo enunciado se les da perfectamente definido. En la práctica profesional, como en la vida, lo difícil es enunciar el problema, incorporando todos los condicionantes existentes y resaltando cuál es el objetivo que se persigue, situando el problema en un contexto suficientemente amplio. De hecho, sugiere una mayor utilización, en el área técnica, de lo que se hace con profusión en las escuelas de negocios, a saber, el análisis y definición del problema por grupos de profesores y alumnos, y el estudio conjunto de las distintas soluciones posibles.

EN lo que se refiere a las realizaciones de ESTEYCO, creada y presidida por Rui-Wamba, estimo obligado destacar alguna de ellas, por reflejar adecuadamente la preparación técnica del nuevo Académico.

Así, destacan entre otras obras singulares el acceso a Vigo en la Autopista del Atlántico, el del Río Cadagua en Castrejana, Bilbao, el Pabellón de los Descubrimientos en la Expo 92, el Puente de Tablate, entre Granada y Motril, con un arco metálico de 140 m de luz en una zona sísmica de grado IX y el proyecto del World Trade Center en Sofía y alguna de las obras emblemáticas de la Barcelona Olímpica.

EN el campo de la utilización de materiales o tecnologías innovadores, merecen mencionarse, entre otros, las losas postensadas con cables no adherentes en el Edificio Mirasierra, el hormigón de alta resistencia H-80 en las Pasarelas de Montjuic, el Edificio Pabellón del Descubrimiento, de la Expo, de 126 m de longitud, sin juntas de dilatación, un edificio con cuatro sótanos bajo nivel freático en Málaga y la demolición mediante técnicas especiales de corte y desgarramiento del Viaducto de acceso a Vigo, de la Autopista del Atlántico.

POR último y dentro de las actividades de carácter normativo o metodológico, destacan las Recomendaciones para el Proyecto de Puentes Metálicos y Mixtos para la Dirección General de Carreteras, la Guía para el Proyecto de Puentes Integrales y la Supervisión de Proyectos de Autovías también para la Dirección General de Carreteras.

A CONTINUACIÓN, voy a referirme a algunas actividades realizadas por la Fundación Esteyco. Además de las publicaciones, tales como "La estética de las obras públicas", "Leonardo Torres Quevedo y el transbordador del Niágara" o "Conversaciones con un Arquitecto del Pasado. Diálogo de la técnica y el espíritu", o coloquios de tanto interés como "La belleza de las obras públicas" destaca, a mi juicio, el concierto organizado sobre "Música de un puente" en tres versiones musicales preparadas por tres compositores, tomando como base las notas musicales deducidas de las medidas de las frecuencias de vibración del Puente de Unquera, proyectado por Javier Rui-Wamba y su equipo. La génesis de la idea de este concierto fue la siguiente:

"La estática no existe y las estructuras, en concreto los puentes, están continuamente vibrando. Si aplicamos en la estructura de un puente acelerómetros con suficiente sensibilidad, percibiremos con claridad su movimiento. Tanto teórica como experimentalmente, se pueden identificar con precisión las frecuencias de vibración de un puente, que son sus características propias. Las frecuencias de vibración de un puente suelen ser muy bajas, en el rango de algunos herzios y, por lo tanto, están fuera de las frecuencias audibles. Sin embargo, si amplificamos dichas frecuencias naturales aplicando un factor de amplificación que sea otra característica geométrica del puente, por ejemplo, su longitud, nos encontraremos con un conjunto de frecuencias audibles que serán las señas de identidad musical del puente en cuestión y, por tanto, diferentes de cualquier otro".

Como se indicó anteriormente, este procedimiento se aplicó al puente de FEVE sobre el río Unquera, en el límite entre Santander y Asturias, cuya construcción se completó hace 13 años. En el puente de Unquera se "escuchan", al paso de los trenes, notas musicales medidas en los vanos central y laterales con locomotoras o trenes a velocidades de 60 y 45 Km/h. En base a estas notas, con la frecuencia amplificada de la manera indicada, se generaron tres partituras tituladas "Tina Mayor en Tono Menor", que es una breve pieza para piano, "Murmillos de Unquera" y "Sobre Tina Mayor", cuyos autores son tres ingenieros en activo que, además, son compositores musicales.

Esta admirable unión de la técnica y el arte, heredada de la visión platónica del humanismo renacentista y de su concepción unitaria del saber, ya inició sus primeros pasos en nuestra arquitectura románica pirenaica donde, tal como ha sido evidenciado por el musicólogo alemán Marius Schneider, la simbología de los capiteles de los claustros está vinculada a notas musicales, reflejando esta visión plural de la expresión cultural del pueblo.

EXPUESTOS tres aspectos relevantes del historial profesional y humanista de Rui-Wamba, permítanme una referencia al discurso que acaba de pronunciar. Lo más importante del discurso es la conexión de campos tan aparentemente alejados como la ingeniería estructural y el comportamiento

humano. La Ingeniería nace y se desarrolla en un entorno social, económico y político que la influencia y sobre el que puede y debe influir. El ingeniero es un ser social y la Ingeniería es una parte esencial de la Sociedad. Y el Discurso lo pone de manifiesto. Por otra parte, este planteamiento atrae la atención de otras especialidades hacia las metodologías y conocimientos que utilizamos y que son patrimonio de la ingeniería estructural, y, es posible también, que métodos y técnicas utilizadas en otros campos podrían contribuir al progreso en el campo de la ingeniería estructural. Con frecuencia, en la historia de la ciencia y de la tecnología, el descubrimiento de las similitudes entre diferentes campos ha sido un factor decisivo para el progreso. Es de todos sabido cómo ha mejorado la tecnología aeronáutica el mejor conocimiento del vuelo de las aves, o cómo la comprensión profunda de los mecanismos del oído humano ha impulsado la tecnología de la alta fidelidad en la reproducción del sonido. En todo caso, eliminar barreras entre especialidades y colectivos, promueve la comunicación y contribuye al progreso.

En síntesis, el Discurso de Rui-Wamba hace patente el interés de los técnicos por las humanidades, como no podía ser de otra forma en quienes tienen el oficio de pensar, comprender y transmitir sus conocimientos en una concepción de un saber integrado con la vida y con la sociedad.

Dicho lo anterior, deseo concluir con unas breves reflexiones respecto a alguna inquietud que siento en lo que se refiere a la formación del ingeniero, en su sentido más amplio. La primera, a que la complejidad creciente del aparato matemático utilizado y los poderosos medios de cálculo de que se dispone, acaben alejándonos del problema real y de su completa comprensión. La segunda, que la avalancha de información de la que hoy se dispone, unida a las facilidades que ofrece el mundo que nos rodea y la evolución acelerada hacia la sociedad consumista, lleve a los futuros profesionales a considerar como secundario todo aquello que no tenga incidencia directa en su práctica profesional, en detrimento de una formación integral, la triste imagen del ingeniero unidimensional. La historia de la Ingeniería en España está llena de personalidades que han sido capaces de brillar simultáneamente en la técnica, la política, la cultura o la diplomacia y se corre el riesgo de que no sea así en el futuro. Dado que estamos en la



Escuela de Minas, permítanme que cite un nombre, inscrito en lo alto de este Salón de Actos, Lucas Mallada, que fue capaz de doblar su condición de ingeniero-geólogo ilustre, con aportaciones destacadas, entre otras, a la elaboración del primer Mapa Geológico de España, con su vocación política que le llevó a ser, junto a Costa, uno de los máximos representantes del regeneracionismo, tan crudamente reflejado en su libro "Los Males de la Patria".

Hemos de fomentar la formación humanística de los futuros ingenieros, revisando quizá los planes de estudio, dando entrada a materias optativas de carácter mixto y organizando ciclos de conferencias de carácter voluntario, que den dicha formación complementaria que de ninguna manera es accesoria. Esta labor que antes cumplían en alguna medida los Colegios Mayores, debe ser incorporada urgentemente a nuestros planes de enseñanza, si queremos que el ingeniero de mañana sea un motor y no un simple especialista de esta sociedad cada vez más universal y pluralista.

CONCLUYO diciendo que Rui-Wamba es un admirable ejemplo de esas personalidades que a lo largo de la Historia de la Ingeniería en España han sabido destacar en campos diversos. Confío en que su ejemplo sea seguido por otros muchos y que las nuevas generaciones mantengan viva la figura del Ingeniero Superior. Superior por la amplitud de su visión, por su sensibilidad social, por su inquietud cultural, capaz de dinamizar la sociedad de la que forma parte, más allá de por sus imprescindibles conocimientos técnicos.

JOSÉ LUIS DÍAZ FERNÁNDEZ

REALIZACIÓN Y DISEÑO GRÁFICO
PILAR CARRIZOSA

DIBUJOS: DANIEL Y MIGUEL DEL OLMO APARICI
FOTOCOMPOSICIÓN, FOTOMECÁNICA E IMPRESIÓN
GRÁFICAS PALERMO, S. L.
PAPEL: REGISTRO AHUESADO, 125 G/M².
TIPOGRAFÍAS: GILL SANS Y SYMBOL
EDITA: ACADEMIA DE INGENIERÍA