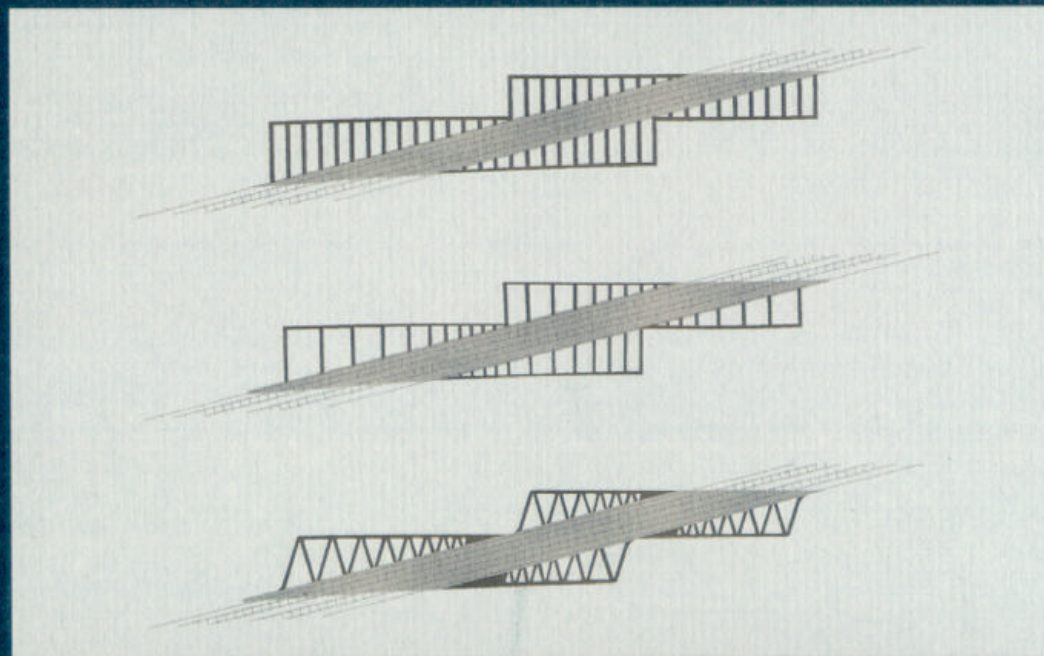


JAVIER RUI-WAMBA. PRÓLOGO / FOREWORD: JÖRG SCHLAICH

AFORISMOS ESTRUCTURALES • STRUCTURAL APHORISMS

que pueden ser de utilidad para comprender determinados comportamientos de los seres humanos • which can be helpful to understand certain human behaviour patterns



FUNDACION
ESTEYCO

Agradecimientos

Este texto no habría visto nunca a la luz si los excepcionales ingenieros y arquitectos que constituyen la Academia de Ingeniería, no me hubieran elegido para ser su compañero. Su contenido es desarrollo del Discurso que pronuncié para formalizar mi ingreso en la Academia. El que fuese el primero en la joven Historia de una Academia cargada de futuro, fue un reto y un estímulo evidente al que espero haber dado una respuesta honorable. Es, por tanto, a mis compañeros de Academia y a la Academia como Institución, a quienes debo el primer y evidente agradecimiento.

Querría, no obstante, exteriorizar mi especial agradecimiento a dos de los Académicos. Fue el Pr. Manuel Elices Calafat quien me presentó y, convencido de que mi presencia en la Academia contribuiría al logro de las finalidades para las que fue creada, impulsó mi candidatura. Tengo el compromiso añadido de no defraudarle. Recordar que su Discurso de entrada en la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, se titulaba “*Sobre la necesidad de las imperfecciones*”, manifiesta la influencia que ha tenido en la elección del tema sobre el que versó el mío.

Un especial agradecimiento también para José Luis Díaz Fernández, que, conociéndome muy poco, tuvo la elegancia y la generosidad de apadrinar mi entrada en la Academia, respondiendo con un generoso discurso al que yo pronuncié. Desde entonces, él tiene un amigo nuevo. Yo también. Y que sea Ingeniero de Minas quien contestó el Discurso de un Ingeniero de Caminos, tiene un especial significado. La Academia integra a ingenieros de todas las especialidades y a Arquitectos como Ignasi de Solá-Morales y Rafael Moneo. Son muchas más las cosas que nos unen a todas nuestras profesiones que las que aparentemente nos pueden separar, que suelen tener por origen corporativismos egoístas y trasnochados que es indispensable superar.

El primer libro que editamos en la Fundación era una edición bilingüe castellano-euskera. Fue una forma de homenaje a mi madre. A ella le hubiese gustado mucho tenerlo en sus manos.

Ahora editamos los Aforismos en edición bilingüe español-inglés. Es una forma de homenajear también al amplísimo colectivo de colegas de todo el mundo que con sus publicaciones, trabajos, investigaciones y enseñanzas han contribuido a mi formación, son corresponsables de mis aciertos y ha limitado el número y la importancia de mis “horrores”.

Es en su honor que rogué a Jörg Schlaich que escribiese el prólogo. Yo le conocí hace años en alguna reunión de una admirable Institución, el CEB. Luego nos hemos visto de vez en cuando, lo que no ha impedido que el afecto esté cada vez más presente en nuestros esporádicos encuentros. Yo siempre me he interesado por todo lo que hace y por todo lo que escribe. El es uno de los más grandes ingenieros modernos y sus variadísimas y bien conocidas obras están entre las más interesantes que se han construido nunca. Es un privilegio para los lectores y para mí que los Aforismos estén prologados por Jörg Schlaich, al que debo profundo agradecimiento.

Este libro no se habría podido traducir del español al inglés si no hubiese tenido al lado a Joaquín Martí. Un prodigio como persona y como ingeniero. No hay muchas cosas mejores que poder tenerle cerca y como amigo. Su discreción suele pretender ocultar su sabiduría. No lo consigue. La calidad de la traducción al inglés de un texto tan complicado es un pequeño índice de ello.

Él no lo sabe, pero mi Discurso y este texto no lo podría haber escrito sin la ayuda discreta, eficazísima e indispensable que Francisco Rodríguez Martínez, el más sabio y entrañable de los que en 1966 salimos con nuestro título y nuestras ilusiones de la Escuela de Ingenieros de Caminos del Retiro madrileño, me presta a mí y a los que

están conmigo. Quede aquí explícito testimonio de ello. Las Mari Cármenes, Diana, Elena y Paco deben saberlo.

En el ocaso de mi Discurso leído, agradecí genéricamente a Gloria, a Isabel, a Silvia, a mis hermanos, a mis amigos, a mis compañeros, porque todos han contribuido a preservar y germinar ilusiones que son indispensables para abordar este tipo de trabajos. Aquí reitero mi gratitud a la que espero corresponder más de lo que he correspondido.

He dejado para el final de este brevísimo relato de agradecimientos debidos, a mis compañeros de trabajo de Esteyco. Muchos llevamos mucho tiempo juntos, y lo que yo hago y escribo es, por tanto, patrimonio de ellos tanto como mío. Y una forma de agradecerse a todos es, en su nombre, hacerlo explícitamente con Miguel Ángel Fernández. Empezamos a trabajar juntos hace 27 años, antes de que él hubiese terminado su carrera de ingeniero. ¡Cuánto hemos trabajado juntos! Y cuanto he aprendido y experimentado a su lado. Recordarlo es recordar, también los apoyos de Luis, Tomás, Gregorio, Daniel, los Enriques, Ramón, Pepe, Sebas, Ricardo, Miguel, Ignacio, Cristina, Alberto, Andreu, Paco, Marisol, Juanjo, José Luis, Jesús, Miguel Ángel, Nacho, Manfred, Jose, Gildo, Rosa, José Manuel, Dani, Josep M^a, Gabi, Nuria, Ricardo, Álvaro, Xavier.

Y gran injusticia sería la de no citar a María Sepúlveda, mujer de poeta, paradigma de competencia que por entender, entiende hasta mi letra. Y de nuevo a Isabel Rui-Wamba, mi hija y nuestra abogada, alma de una Fundación con más de un alma. Y a Pilar Carrizosa, amiga de todos y arquitecto incomparable, a quien debemos, entre otras cosas, el diseño gráfico de todos los libros que hemos publicado en la Fundación Esteyco.

PRÓLOGO

Ya el libro anterior de la *Fundación Esteyco* me encantó infinitamente, porque con el ejemplo del excelente y universal ingeniero español Torres Quevedo y su ingenioso funicular sobre las Cataratas del Niágara expone toda la amplitud técnica e intelectual de la ingeniería civil constructiva. Nos comunica como conocimientos fundados y amplios y amor al detalle constructivo, unidos con fantasía, entusiasmo y sentido de responsabilidad social, crearon una construcción de una extraña belleza y eficiencia, en cuyo centro se encuentra el hombre. Pero hace falta también un autor como Javier Rui-Wamba, un ingeniero con intelecto y alma, para hacer renacer un talento como Torres Quevedo en su entorno histórico e intelectual de una forma tan viva para nosotros que semejante libro no sólo nos sirva como solaz intelectual sino que también nos obligue inmediatamente a reflexionar de manera crítica sobre nuestro propio trabajo. En mi caso alcanzó tal grado que planeé en un concurso para un puente de carretera sobre el ancho valle del Elba al lado de Dresde un funicular colgante debajo del puente para la conexión directa para los peatones. Estaba convencido de que ya sólo por eso debería de ganar el concurso y consecuentemente eché la culpa de que finalmente no fuese así al hecho de que los miembros del jurado no conocieron este hermoso libro.

Estos “aforismos” persiguen el mismo objetivo con otros medios: Mostrar que la ingeniería civil constructiva sólo puede cumplir sus responsabilidades si refleja su contexto social, económico y político y que, viceversa, una sociedad humana estaría condenada a la pobreza miserable y la enfermedad dolorosa, si no dispusiera de una infraestructura técnica creada por ingenieros. Por último, que el hombre enferma mentalmente, si las construcciones de la ingeniería en su espacio vital sólo se ajustan a los criterios técnicos y económicos y si

PRÓLOGO

no están correctamente proporcionadas y, bien diseñadas, de tal forma integradas en su entorno natural, que se las siente como parte inseparable del arte de la construcción. ¡La única contraprestación del hombre para la invasión de la naturaleza con construcciones es la cultura!

La verdad es que una persona ajena se tiene que preguntar frente a la ingeniería civil constructiva, porque la mayoría de los ingenieros siguen tratando el proyecto, el momento de nacimiento de su obra, con tanta negligencia, ya que es la fase más hermosa, estimulante y creativa de todo el proceso de planificación. Aquí se mezcla el saber de base científica técnica del ingeniero inseparablemente con su fantasía, su alegría de innovar, ¡un verdadero placer! Dificultades con la estática o con la ejecución de la obra se deben casi siempre a un proyecto negligente. “Una estructura que no se sabe dibujar no se debe calcular; una fórmula, cuyo significado físico no está claro no se debe utilizar.....” (7. aforismo). Por otro lado, el ingeniero con alegría de innovar no se enfada por condiciones de entorno difíciles en casos aislados, sino le están bienvenidos como posibilidad para un único proyecto referido al lugar y acepta la obligación al ahorro y a la eficiencia como maestro. Sí le afecta sin embargo que hoy día el coste de las materiales de construcción es demasiado bajo y el de los salarios demasiado alto, lo que perjudica construcciones de ingeniería filigranas, ligeras y variadas. Urgentemente habría que aliviar fiscalmente el trabajo y encarecer como compensación las materias primas. Entonces los detalles innovativos y amables serían otra vez pagables, se crearía empleo y se aliviaría al mismo tiempo el medio ambiente. La calidad tiene por tanto no sólo un valor cultural sino también social y ecológico.

Una nueva forma en la construcción de ingeniería, sorprendente y pegadiza, pero no convulsivamente forzada y efímero, sólo se puede desarrollar a partir de un entorno creativo con la lógica de un flujo de fuerza y de una construcción adaptada al material y la fabricación. En vista del progreso vertiginoso en todos los campos, desde el desarrollo de nuevos y cada vez mejores materiales de construcción, las posibilidades de cálculo y representación asistidas por ordenador,

PRÓLOGO

hasta los más sofisticados métodos de fabricación y montaje, deberíamos acercarnos a una época dorada. Desgraciadamente hay que temer más bien lo contrario; por lo menos en la práctica casi nada de este progreso se manifiesta en una nueva calidad de las construcciones de ingeniería. Al contrario parece que, con algunas excepciones sobre todo precisamente en España, la mayoría de nuestros puentes, torres, pabellones se presentan cada vez más vulgares, monótonos y a veces hasta misantrópicos y lo que es aún peor, en realidad a nadie le molesta; ni a los mismos ingenieros civiles, ni a los propietarios, y mucho menos a la opinión pública, como si construcciones de ingeniería no pertenecieran a la cultura de la construcción. No reaccionamos a problemas con soluciones nuevas sino con prohibiciones, con una densidad de reglamentos proliferando hasta lo absurdo. La profesión del ingeniero no tiene imagen, ya no se tiene en cuenta las construcciones de ingeniería, se espera de ellos solamente una indigna funcionalidad al precio más bajo. Si se trata por ejemplo de un puente encima de un valle cerca de una población, todo el mundo se concentra en la protección acústica y no se conforma hasta haber conseguido una pantalla de protección acústica de 4 m de altura, sin darse cuenta de que alguien, sensible con todos sus sentidos, tiene que lamentar ahora una contaminación estética en vez de acústica.

La causa del mal es la especialización, la parcelación, la estupefacción de los ingenieros, produciéndose todas estas contribuciones al progreso, en realidad admirables y gratas, separadamente, convirtiéndose de esta manera en finalidades en sí. Sabemos de cada vez menos cada vez más, finalmente demasiado para estar aun capaz de tomar decisiones desde un punto de vista superior. Por el miedo justificado de que se nos demande por el incumplimiento de cualquier reglamento, ya sólo elegimos la solución estándar cubierta de los reglamentos. A eso sólo se puede contrarrestar dentro de la formación en las universidades, academias y escuelas, enseñando ya ahí la construcción de ingeniería de forma completa y multidisciplinaria en materia y campo y practicando diseño, incluyendo la colaboración con colegas de otras disciplinas. El ingeniero tiene que comprender pronto que tiene la responsabilidad de la calidad completa de sus construcciones de ingeniería, al igual que el arquitecto para las suyas,

PRÓLOGO

y que tanto la forma como la estática, la construcción y la fabricación pertenecen a ello. Nada de ello debe dejar de lado o delegar, pero la persona autocrítica buscará la colaboración consultiva con arquitectos, urbanistas e ingenieros de otras disciplinas; y siendo buena la colaboración, al final no importa que procedía de quien, sino solamente el resultado: la calidad completa de la obra.

Es fascinante que para la descripción de este deseo, por cierto de acuerdo con el espíritu de su compatriota Eduardo Torrija, uno de los más grandes de nuestra profesión, Javier Rui-Wamba haya elegido el pretencioso y sublime medio del aforismo, del pensamiento inteligente expresado de forma breve, un punto de partida al mismo tiempo típico de ingeniero, ya que el arte más alto de ingeniería se expresa en la reducción a lo esencial. Por eso este medio está evidentemente sólo a disposición del ingeniero talentoso y crítico y sobre todo del profesor bueno y experimentado con formación humanística. Sería imposible y tampoco tendría sentido, querer hacer un balance entre estos aforismos, ya que, como una obra llena de calidad, forman una unidad: está en un equilibrio estable, está construido de forma dúctil y ajustada a los materiales, está feliz cuando sano, desgraciadamente a veces también enfermo, precisamente caprichoso como el hombre, que quiere nacer felizmente y estar bien tratado y cuidado a por vida. La construcción de ingeniería está por tanto sólo parcialmente accesible a la valoración racional por el cálculo y hace falta un ingeniero sensible, al igual que el bienestar físico y el mental del hombre se condicionan mutuamente. Que bonita presentación y referencia alegre a la construcción de ingeniería.

Jörg SCHLAICH

DISCORSI
E
DIMOSTRAZIONI
MATEMATICHE,
intorno à due nuove scienze

Attenenti alla
MECANICA & i MOVIMENTI LOCALI;
del Signor
GALILEO GALILEI LINCEO,
Filosofo e Matematico primario del Serenissimo
Grand Duca di Toscana.
Con una Appendice del centro di gravità d'alcuni Solidi.



IN LEIDA;
Appresso gli Elsevirii. M. D. C. xxxviii.

AFORISMO PRIMERO

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

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

Es natural, por tanto, que su análisis y la reflexión sobre su comportamiento hayan atraído la atención de tantas ilustres inteligencias que a lo largo del tiempo han contribuido a establecer los sólidos fundamentos del análisis estructural.

Así, Galileo en el libro editado en 1638 *“Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove Scienze”*, utilizó el recurso pedagógico y literario del diálogo entre Sagredo y Salviati para plantear la influencia de la esbeltez en la capacidad resistente de una pieza comprimida:

“SAGREDO: Yo estoy convencido por los hechos, pero no comprendo por qué la resistencia no se multiplica en la misma proporción que el material; y yo estoy muy asombrado porque, al contrario, la resistencia aumenta en mayor proporción que la cantidad de material. Así por ejemplo, si comprimimos dos barras cilíndricas, la que tiene doble área soporta no sólo dos veces más la carga, sino tres o tres veces y media más.

SALVIATI: Incluso no se equivocará si dice cuatro veces más.

SAGREDO: Entonces, Salviati, si puedes, tendrías que resolver estas dificultades y clarificar estos conceptos: Porque imagina a qué campo de ideas bellas y útiles da acceso la solución de este problema; y si tú te ocupas de él en tu exposición de hoy, tanto Simplicio como yo, te estaremos muy agradecidos.”

La prudencia de Galileo y, previsiblemente, sus dotes de observación y experimentación, así como el hábito determinista de la época, le llevó a sugerir la respuesta que figura en el diálogo.

Más de un siglo después, Euler demostró que la respuesta “teórica” era que la barra cilíndrica con doble área que otra, soporta 4 veces más de

carga, por cuanto ésta es directamente proporcional a la inercia de la sección que, siendo circular, varía con la potencia cuarta del diámetro.

Hoy la respuesta es que depende, y que la relación de las cargas en el caso expuesto puede variar entre 2, en piezas poco esbeltas, y 4 las de gran esbeltez, y que para precisar el valor hay que aceptar convenciones basadas, ciertamente, en numerosísimos análisis teóricos y experimentales.

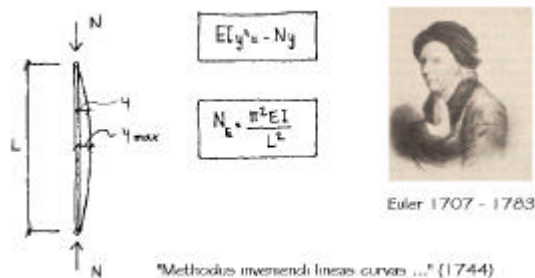
Al recordar el itinerario por los que ha discurrido la progresión en los conocimientos sobre la estabilidad estructural, un hito insoslayable se produce en 1744 cuando el gran matemático alemán Leonar Euler (1707-1783) publica el “Methodus inveniendi Líneas curvas...”, en donde por primera vez se planteó la ecuación diferencial que gobierna el comportamiento de la pieza comprimida biarticulada y el valor de la carga para la que “teóricamente” se desestabilizará la pieza. (FIG.1-2)

La ecuación diferencial expresa la necesidad de equilibrio entre el momento $N \cdot y$ y generado por la carga exterior sobre una sección de la pieza hipotéticamente deformada, y la respuesta o reacción de la sección a la deformación que es el momento interno, proporcional a la rigidez EI e inversamente proporcional al radio de curvatura que simplificado se toma como y'' ,

$$\frac{1}{R} = \frac{y''}{(1 + y'^2)^{3/2}} \approx y''$$

Al valor de la carga, N_E , se conoce desde entonces, en honor de su autor, como carga crítica de Euler, y es la fórmula de referencia en la que se basan, explícita o implícitamente, todos los planteamientos modernos de la inestabilidad estructural.

El recuerdo de Leonard Euler, a los ingenieros de caminos españoles, nos hace evocar también la de Agustín de Betancourt, fundador de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid hacia 1800, a imagen de la prestigiosa Ecole des Ponts et Chaussées de París. Ambos murieron y están enterrados en San Petersburgo, ciudad ilustrada de la época en la que la corte de los zares atraía a intelectuales y destacadas personalidades de las artes y las ciencias. Como ocurrió con Euler. Como ocurrió también con Agustín de Betancourt (1756-1820) que nació en la isla de Tenerife, (probablemente de la estirpe de Jean de Bethencourt, el normando que inició en 1402 en Fuerteventura la conquista de las Islas Canarias), acabó siendo ministro de Obras



Públicas del zar Alejandro II, promoviendo y construyendo en Rusia infraestructuras viarias, portuarias y fluviales, edificios como el de la Escuela de Equitación de Moscú, ciudades nuevas como la de Nizhni Novgorod (también conocida como Gorky) y creó también la Escuela de Ingenieros de San Petersburgo, ciudad en la que se preserva su recuerdo.

A partir de Euler fueron muy numerosos los matemáticos que, al tiempo que impulsaron el desarrollo del cálculo diferencial y de otras especialidades del saber matemático, se interesaron por los problemas de inestabilidad estructural y aplicaron en su solución los nuevos conocimientos disponibles.

Es Lagrange, quien a partir de los trabajos de Euler y D’Alambert, en su memoria “*Sur la figure des colonnes*”, resolvió con generalidad la ecuación diferencial:

$$EIy'' = -Ny$$

Demostró que dicha ecuación se cumple para una geometría senoidal de la deformada, de ecuación:

$$y = A \sin kx \quad \text{siendo } A \text{ una constante, y } k = \sqrt{\frac{N}{EI}}$$

La ecuación de la deformada cumple la primera condición de contorno, $y = 0$ para $x = 0$

Para que se cumpla la segunda: $y = 0$ para $x = L$, debe verificarse que:

$$0 = A \cdot \sin kL$$

Este es un típico problema de autovalores, que tiene dos soluciones posibles:

- I. $A = 0$ es decir, que no puede existir otra deformada que la recta, $y=0$, cualquiera que sea el valor de la carga, N , aplicada.
- II. $\sin kL=0$ cualquiera que sea el valor de la constante A , y por tanto de la amplitud de la deformada senoidal.

Esta condición se cumple siempre que,

$$kL = n\pi$$

esto es, para valores de:

$$k = \frac{n\pi}{L}$$

es decir, para valores de N , tales que:

$$N_{cr} = n^2 \cdot \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

siendo n , el número de ondas de la geometría senoidal del soporte comprimido

Para $n=1$, tendremos la carga crítica de Euler: $N_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$ (fig. 1-3)

Para otros valores de n , tendremos (fig. 1-4)

En síntesis, por tanto, la solución de la ecuación diferencial que representa el comportamiento de la pieza comprimida de Euler, tiene dos soluciones posibles:

- I. en la que la pieza comprimida permanece recta, cualquiera que sea el valor, N , de la carga aplicada;
- II. otra, en la que cuando la carga alcanza su valor crítico, N_E , la barra padea con una deformada senoidal quedando indeterminado el valor de su desplazamiento transversal máximo $y_{max}=A$.

El comportamiento de la barra comprimida, según la teoría de Euler, tiene una representación gráfica muy expresiva. (fig. 1-5)

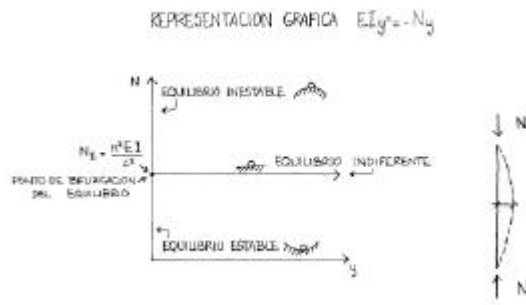
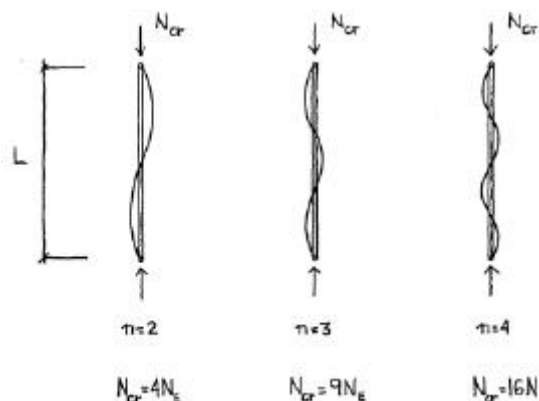
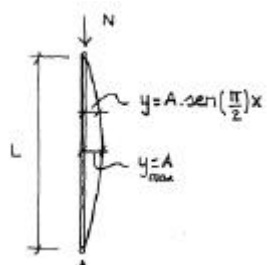
Cuando comenzamos a aumentar la carga sobre el soporte biarticulado, la pieza se mantiene recta y la línea representativa de su comportamiento es la ordenada $y=0$. Es la rama de equilibrio estable simbolizada por la esfera situada en una superficie cóncava que, cuando la soltamos tras un ligero desplazamiento, vuelve a su posición original.

Si continuamos el proceso de carga llegaremos a un valor, el de la carga crítica de Euler.

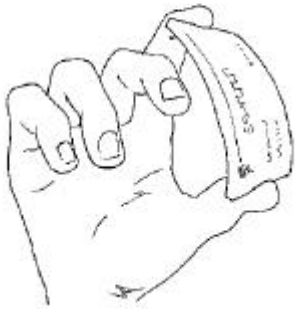
$$N = N_E = \frac{\pi^2 EI}{L^2}$$

La barra que estamos cargando tendrá, entonces, dos posibilidades teóricas:

- I. Continuar indefinidamente recta, con independencia del valor de la carga. Corresponde a la primera solución de la ecuación diferencial y está representada por la rama vertical del diagrama que nace del



PERCEPCIÓN HUMANA DE LA INESTABILIDAD ESTRUCTURAL
HUMAN PERCEPTION OF STRUCTURAL INSTABILITY



PERCEPCIÓN HUMANA DE LA INESTABILIDAD ESTRUCTURAL
HUMAN PERCEPTION OF STRUCTURAL INSTABILITY



punto, en el que $N=N_E$. Es la *rama de equilibrio inestable*, simbolizada por la esfera situada sobre una superficie cóncava: cualquier desplazamiento de su posición de equilibrio inestable en el vértice provoca su caída incontrolada.

- II. Que alcanzado el valor de la carga crítica $N=N_E$, la pieza se deforme senoidalmente y no acepte ninguna carga adicional, siendo irrelevante la amplitud de la deformada. Esta posibilidad queda representada por la rama horizontal del diagrama que parte del punto N_E : es la *rama de equilibrio indiferente*, y se puede simbolizar con la esfera situada en un plano horizontal. Si la desplazamos de su posición horizontal, la esfera se queda en la nueva posición.

Del punto del diagrama, para el que la carga coincide con la crítica de Euler, N_E , nacen, por tanto, dos ramas teóricamente posibles: la de equilibrio inestable ($\gamma=0$, $N>N_E$) y la de equilibrio indiferente ($\gamma\neq 0$, $N=N_E$). Por ello, se le denomina “*punto de bifurcación de equilibrio*”.

El comportamiento de la barra comprimida, modelizado por la formulación de Euler y representado en el diagrama con las tres formas posibles de equilibrio y la brusca posibilidad de que se produzca la “bifurcación de equilibrio”, no corresponde a la percepción que tenemos de su comportamiento real.

Recordemos, a modo de ejemplo, 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, sobrepasado 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. (fig.1-6)

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.

Podríamos estar frente a uno de esos ejemplos que a veces, inadecuadamente, se citan, de discrepancias entre la “teoría” y la “práctica” fomentando ámbitos autónomos e incommunicados entre los que practican la ingeniería y los que investigan y enseñan sus

fundamentos. Pero se trata más bien de un excelente ejemplo de todo lo contrario. Euler no estaba equivocado, aunque los resultados de sus planteamientos difiriesen notablemente de los que se pueden observar y medir en la realidad.

Euler partió de unas hipótesis muy claras que simplificaban y hacían posible el análisis de la pieza comprimida. La observación, el estudio y la experimentación, han ido progresivamente acotando el campo de validez de las hipótesis de partida de Euler y ajustando los valores que resultan de las formulaciones consiguientes con los “reales”, expresión que es, por otra parte, imprescindible entrecomillar. Pero la metodología que nació con Euler y sus continuadores, permanece y ha sido esencial como marco eficaz del progreso en nuestros conocimientos sobre la estabilidad estructural.

La causa de las incoherencias entre comportamiento real y teórico de la pieza comprimida se encuentra en las hipótesis de las que Euler, conscientemente, partió para establecer la ecuación diferencial.

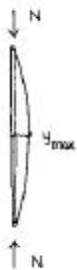
Euler supuso, en efecto:

- que inicialmente la pieza que va a ser comprimida tiene una geometría perfectamente recta;
- que la carga N , está perfectamente centrada y alineada con la directriz recta de la pieza;
- que el material es perfectamente e indefinidamente elástico manteniendo sus características, cualquiera que sea el nivel de carga;
- que la pieza está totalmente distensionada y no existen tensiones residuales autoequilibradas que puedan influir en su comportamiento.

Ninguna de estas “perfecciones” son atributos de la pieza real. Euler modelizó una pieza idealizada, sin imperfecciones.

EXPLICACIÓN DE LA INCOHERENCIA ENTRE EL COMPORTAMIENTO
TEÓRICO Y REAL

EXPLANATION OF INCONSISTENCIES BETWEEN IDEAL AND
REAL BEHAVIOUR



$$EI y'''' = -Ny''$$

HIPÓTESIS / HYPOTHESES

pieza perfectamente recta / perfectly straight member

carga N perfectamente centrada / centred load

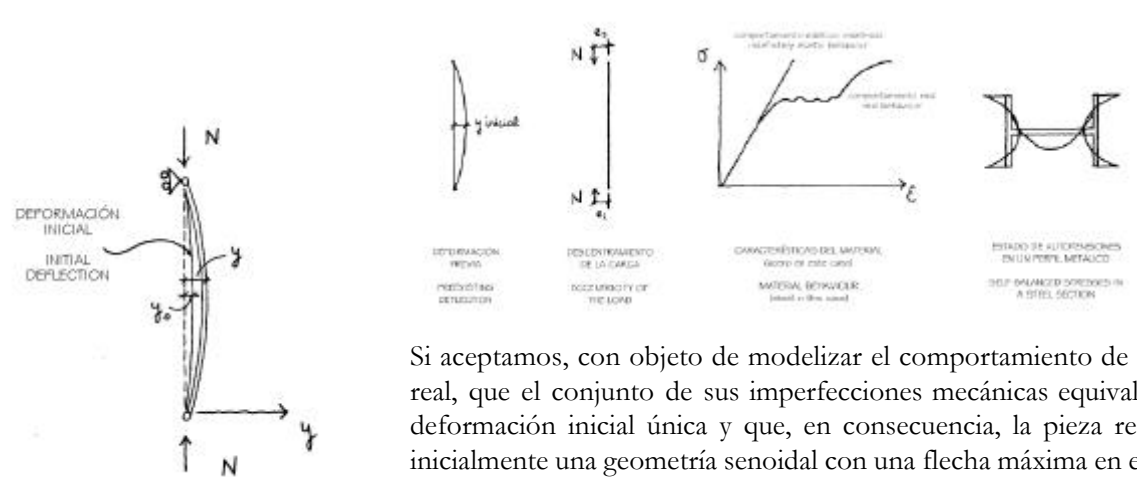
material perfectamente elástico / elastic material

pieza perfectamente distensionada / initially stress-free

PLANTEAMIENTO DE EULER : PIEZA RECTA IDEAL
EULER'S HYPOTHESES IN THE IDEALIZED PROBLEM

La “pieza real” por contraste con la “pieza perfecta o ideal” de Euler, se caracterizará por los siguientes rasgos:

- Su directriz no será nunca perfectamente recta. Es inevitable una deformación inicial de geometría impredecible.
- La carga no estará nunca perfectamente centrada. Es inevitable una cierta excentricidad de las cargas aplicadas.
- El material de la pieza no tiene un comportamiento indefinidamente lineal y elástico, por lo que no es indiferente el nivel de cargas y deformaciones a las que estará sometido.
- Los procesos de fabricación y manipulación de las piezas y los efectos de las condiciones ambientales (gradientes de temperatura, por ejemplo), generan inevitables tensiones residuales que se autoequilibran pero que afectan al comportamiento de la pieza real.



Si aceptamos, con objeto de modelizar el comportamiento de la pieza real, que el conjunto de sus imperfecciones mecánicas equivale a una deformación inicial única y que, en consecuencia, la pieza real tiene inicialmente una geometría senoidal con una flecha máxima en el centro y_0 , la ecuación de equilibrio que ya hemos visto para la pieza ideal, se transformará en la de equilibrio de la pieza “real”. (fig. 1-10)

$$N \left(y + y_0 \cdot \sin \frac{\pi x}{L} \right) = -EI y''$$

La solución aproximada de esta ecuación diferencial es de la forma:

$$y = y_0 \cdot \frac{1}{1 - \frac{N}{N_E}}$$

Expresa que el efecto de una compresión N en el soporte equivale a una amplificación de la deformada inicial, y_0 , siendo el factor de amplificación:

$$\mu = \frac{1}{1 - \frac{N}{N_E}}$$

o desarrollando en serie

$$\mu = 1 + \frac{N}{N_E} + \left(\frac{N}{N_E}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_E}\right)^3 + \dots$$

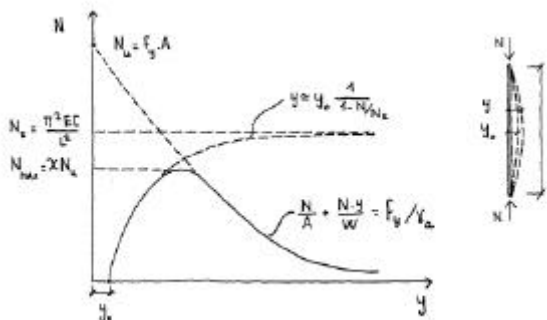
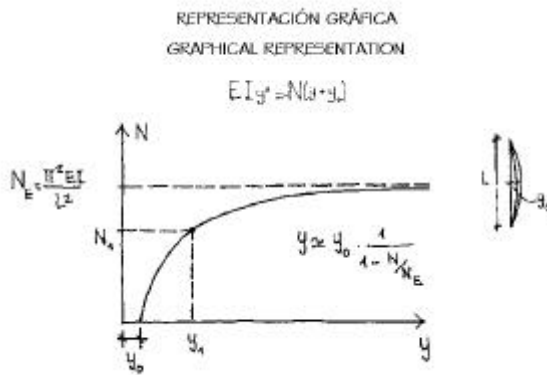
De esta manera, a cada valor de N le corresponde un valor de y , habiendo desaparecido la inverosímil indeterminación que, al respecto, resultaba para la pieza perfecta o ideal. (fig. 1-11)

La curva N - y , que es la que nos interesa destacar a los efectos del aforismo que hemos enunciado, es asintótica con la carga crítica de Euler y está naturalmente acotada en su validez por las limitaciones que imponen las características del material y las tensiones residuales inevitablemente presentes en la pieza analizada.

Así, en el caso de un soporte metálico, la capacidad máxima de un soporte biarticulado se identifica con la cota más elevada de la curva que hace la transición entre la N - y , que supone el material indefinidamente elástico y una deformación inicial y_0 , y la que señala la capacidad máxima de la sección de un material caracterizado por su límite elástico, f_y , dividido por un coeficiente de seguridad, γ_a , como valor máximo alcanzable.

Es lo que, a modo de recuerdo, ha quedado representado en la siguiente figura. (fig. 1-12)

Quede también constancia que en todo tipo de estructuras, de hormigón o de acero estructural, o mixtas o de madera, el planteamiento de la verificación de la estabilidad estructural o del pandeo como habitualmente se denomina, es análogo aunque no siempre lo parezca. En todas ellas el problema consiste en decidir cuál es la curva que representa la capacidad de la sección



$$\left(\frac{N}{A} + \frac{N \cdot y}{W} = \frac{f_y}{\gamma_a}, \text{ en las metálicas} \right)$$

y cuáles son los valores de la deformación inicial, y_0 , y de la carga crítica de Euler,

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

lo que a su vez plantea el arduo problema de establecer el valor de la rigidez EI y de la longitud de pandeo L que se debe considerar cuando, como suele ser habitual, las deformaciones de los extremos del soporte están coaccionadas.

Demos así por concluido el inevitable e imperfecto resumen del comportamiento del soporte comprimido y tratemos de sacar de ello algunas conclusiones que nos ayuden a identificar similitudes con el comportamiento de los seres humanos.

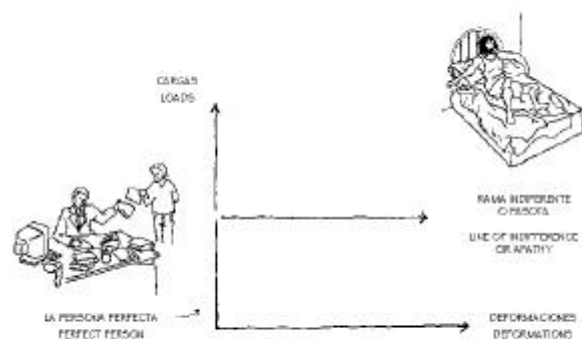
I. *La perfección no existe y, en todo caso, sería indeseable por peligrosa.*

Como acabamos de ver, la barra “perfecta” cuando va aumentando la carga que ha de soportar no manifiesta ningún síntoma, manteniéndose perfectamente recta hasta que de repente, sin avisar, al llegar al valor de su carga crítica y, por tanto, a su punto teórico de bifurcación de equilibrio, se deforma incontroladamente y no acepta ningún incremento de carga, por leve que sea.

El ser humano, hipotéticamente perfecto (del que en la vida siempre se conoce generalmente por referencias algún espécimen que aparenta serlo), es aquel al que no parecen afectar 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 llegado, sin avisar, a su punto de bifurcación de equilibrio y en su caminar toma bruscamente el ramal del 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. (fig. 1-13)

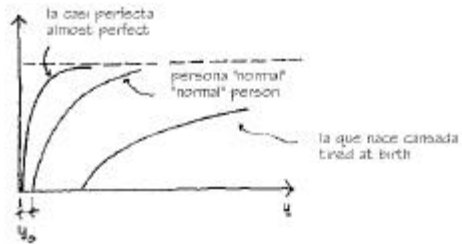
II. *Las imperfecciones son inevitables, y deseables dentro de unos límites que en las estructuras acotamos en nuestros reglamentos, y en los seres humanos acota explícita o implícitamente la Sociedad.*

LA SIMILITUD CON LA INESTABILIDAD DEL COMPORTAMIENTO HUMANO
ANALOGY WITH INSTABILITY IN HUMAN BEHAVIOUR



La perfección no existe y en todo caso sería indeseable por peligrosa
Perfection does not exist; if it did, it would be too dangerous to be desirable

LA SIMILITUD CON LA INESTABILIDAD DEL COMPORTAMIENTO HUMANO
ANALOGY WITH INSTABILITY IN HUMAN BEHAVIOUR



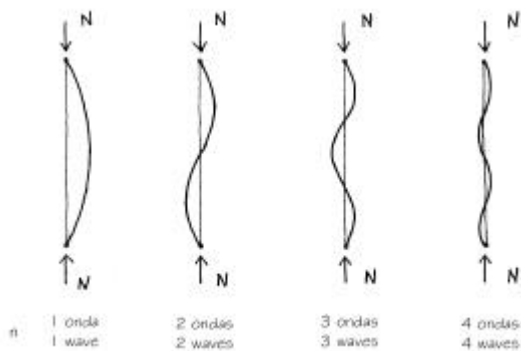
La imperfección es inevitable y deseable dentro de unos límites
Imperfections are inevitable and desirable with limits

Si suponemos que el conjunto de imperfecciones de un ser humano puede, también, considerarse englobado en una deformación inicial equivalente, la carga que debe soportar produce que esta deformación inicial se amplifique. Cuanto mayor es la carga, mayor y más evidente es la deformación que se manifiesta a los ojos del observador atento. Incrementos sucesivos de carga producen deformaciones mayores o, de otra manera, el ser humano es capaz de soportar menores incrementos de carga a igualdad de incrementos de deformaciones.

Si recuperamos el diagrama de cargas-deformaciones del soporte estructural comprimido y hacemos variar su deformación inicial, tendremos un conjunto de curvas que se tienden más rápidamente cuando la deformación inicial aumenta. (fig. 1-14)

Una pequeña deformación inicial aproxima el comportamiento al de la barra perfecta. Una deformación inicial importante lleva consigo una gran deformabilidad de la barra y una reducidísima capacidad de cargas.

Así pasa también con los seres humanos. Los hay con una deformación inicial equivalente pequeña, con gran capacidad de carga para pequeñas deformaciones. En el otro extremo están los que, en términos coloquiales, se suele decir que “nacen cansados”, a los que cualquier carga por pequeña que sea se manifiesta por grandes deformaciones, y son, por tanto, poco capaces de soportarlas. Los primeros pueden ser peligrosos porque no avisan y colapsan bruscamente. Con los segundos no se cuenta demasiado para compartir cargas.



Es delicado poner límites, por arriba y por debajo, a los socialmente admisibles, pero de hecho la Sociedad los pone aunque nadie sea capaz de objetivarlos. Porque, en todo caso, estos límites deben variar según las circunstancias. Porque es imposible categorizar con un simple parámetro la complejidad del comportamiento humano y la variedad de entornos en los que se manifiesta. Porque, en definitiva, estamos hablando de cuáles son en una Sociedad sana los límites de una tolerancia que debe promover la convivencia, la solidaridad, el respeto y la libertad; y desalentar, por encima o por debajo, por uno u otro lado, los egoísmos y las barbaries. En todo caso, lo anterior debe entenderse como un elogio de la tolerancia que cimenta las sociedades sanas.

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.

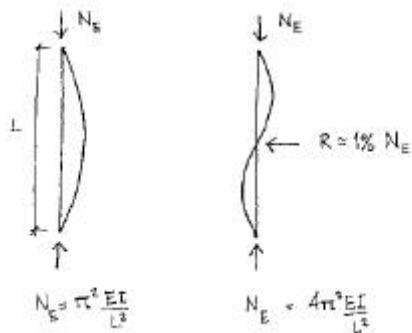
Recordemos de nuevo la expresión general de la carga crítica de Euler:

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

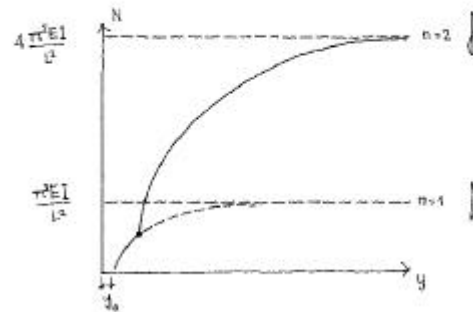
ELOGIO DE LA AMISTAD / EULOGY OF FRIENDSHIP

Carga crítica de Euler
Euler's critical load

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



EL APOYO DE LA AMISTAD
SUPPORT AFFORDED BY FRIENDSHIP



Cada valor de n representa una geometría de la deformada de la pieza pandeada, y a cada una corresponde un valor de la carga crítica. (1-15)

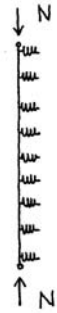
Para que la deformada tenga, por ejemplo, dos ondas, tenemos que imponer que su desplazamiento en el centro sea nulo. Ello exige la presencia de un punto de apoyo que impida la deformación transversal de la barra comprimida. La reacción que puede generarse en dicho apoyo es del orden del 1% de la carga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

Por tanto, un apoyo con una capacidad resistente muy pequeña (aproximadamente un 1% de N) aumenta la capacidad de carga de la barra en 4 veces (400%) sobre la que tendrá la barra sin dicho apoyo.

En el diagrama N - y_{\max} que ya conocemos, tendremos ahora el esquema siguiente: (fig. 1-17)

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.

Realmente estas reflexiones sobre el comportamiento del ser humano, nacidas de la similitud con el comportamiento del soporte comprimido, no son sino un apunte de ideas que pueden ser mucho más amplias, complejas y profundas. Basta, como muestra, lo que sigue:



- El ser humano está sumergido en un medio social que equivale al soporte cuya deformación transversal está coaccionada por innumerables apoyos, que solemos materializarlos con muelles que reaccionan en función de la deformación transversal del soporte comprimido. Si el medio social es adecuado, esto es, amistoso y solidario, el ser humano puede desarrollar en la vida toda su capacidad, puede agotar serena y no bruscamente la vida, habiendo formado parte, a su vez, del entramado social que ha ayudado a los demás a llegar a buen puerto. (fig. 1-18)
- ¿Son las imperfecciones del ser humano innatas o adquiridas? ¿Cuáles son los límites de las socialmente tolerables? ¿Tiene la Sociedad instrumentos para mitigar los efectos de las imperfecciones no tolerables? ¿Es la Sociedad la que amplifica o genera imperfecciones en el colectivo humano que lo componen? ¿Las imperfecciones varían a lo largo de la vida? ¿Por qué y cómo lo hacen? ¿Son las tolerancias invariantes sociales? ¿No son, por ejemplo, algunas encuestas el termómetro con el que se mide la evolución de la tolerancia social?

Son algunas preguntas sin respuestas, pero que pueden tener el valor de atraer reflexión y debate, y contribuyen, creo yo, a esa similitud de comportamiento que ¡cómo no! pretende humanizar las estructuras y no objetivar al ser humano.

AFORISMO SEGUNDO

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

LA MÁS IMPORTANTE VERDAD ESTRUCTURAL
THE MOST IMPORTANT STRUCTURAL TRUTH

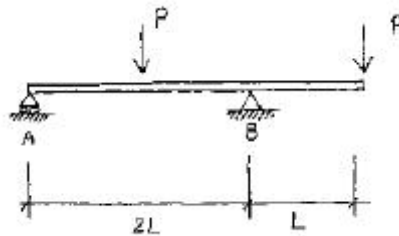
TERCERA LEY DE NEWTON
NEWTON'S THIRD LAW

Resultante de acciones = Resultante de reacciones
Resultant of actions = Resultant of reactions

$$\Sigma P = \Sigma R$$



Isaac Newton
(1642-1727)



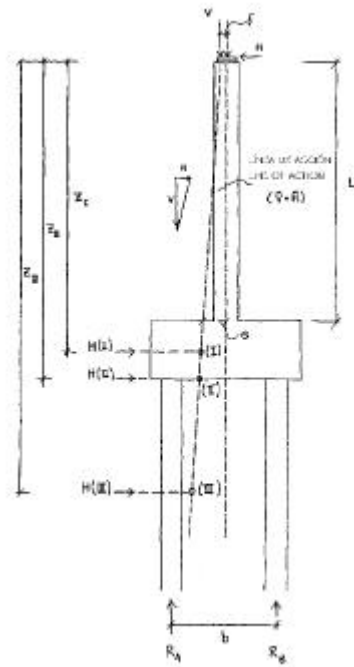
Conviene recordar la más importante verdad estructural, que es una extensión de la tercera ley de Newton: la resultante de las acciones aplicadas en una estructura debe coincidir, en magnitud y posición, con la resultante de las reacciones de apoyo. Mucho tiempo antes, también Arquímedes había expresado un concepto similar. (fig. 2-1)

Hoy nos parece que la ley de Newton y el principio de Arquímedes, son verdades de Pero Grullo, ese metafísico acreditado. Pero no está de más recordarlas, 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 para interpretar 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. (fig.2-2)

Conocidas las reacciones, son inequívocas las leyes de flectores y cortantes. También lo es el dibujo de la deformada. En el tramo entre el apoyo A y la carga P más próxima, los momentos son nulos. Por tanto, este tramo no se deformará y se mantendrá recto, con la geometría inicial. Los dos tramos, a ambos lados del apoyo B, tendrán deformadas simétricas, por serlo también la ley de momentos flectores. En consecuencia, la deformada sería la misma que la viga sin el apoyo A (del que a nadie se le ocurriría prescindir para no convertir la estructura en inestable) pero girada, como un sólido rígido alrededor del apoyo B hasta que el extremo volviese a la posición impuesta por la existencia del apoyo A (ángulo de rotación: $\frac{3f}{2L}$). Es obvio que la flecha final en el extremo en voladizo sería $\frac{5}{2}f$ y en el centro del vano $-\frac{1}{2}f$,

siendo f la flecha $f = \frac{PL^3}{3EI}$ provocada por la carga P actuando en el voladizo empotrado.



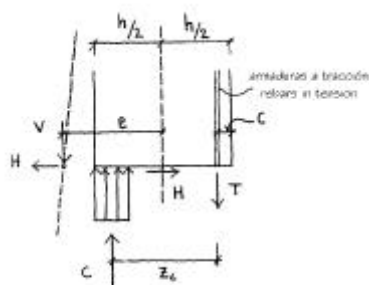
Este es un sencillísimo ejemplo. Propónganlo a estudiantes y a ingenieros. No es infrecuente que, de entrada, no observen lo obvio: que la resultante de las cargas debe coincidir con la resultante de las reacciones. Pídanles que dibujen la deformada y las leyes de esfuerzos. No serán raros los titubeos, y es de temer algún resultado equivocado debido a errores en los cálculos numéricos. (fig. 2-3)

Pongamos ahora otro ejemplo característico al que nos enfrentamos con frecuencia en la práctica profesional. Sea la pila de un puente cimentado sobre pilotes solicitada en cabeza por una carga vertical V y una horizontal H (debida a las acciones exteriores de frenado, viento y a la fuerza centrífuga en tableros curvos), transmitidas del tablero por intermedio de un apoyo de neopreno. Prescindamos, por simplicidad, del peso propio de la pila y de la zapata o encepado. (24)

Cualquier sección de la pila, y en particular la de empotramiento con el encepado, estará solicitada por unos esfuerzos H y $N=V$, aplicados con una excentricidad

$$e = \delta + z \frac{H}{V}$$

en donde δ es el desplazamiento del punto de aplicación de la carga vertical debido a la deformación horizontal del neopreno (debido a las deformaciones impuestas, retracción, rotación, fluencia y temperatura, más las provocadas por la carga horizontal H), a la excentricidad inevitable de V y al desplazamiento en cabeza debido a la flexión de la pila provocada por H más la de segundo orden que genera la excentricidad de V a lo largo de la altura de la pila.



CONDICIONES DE EQUILIBRIO
EQUILIBRIUM CONDITIONS

$$C = V + T$$

$$T = V \frac{e + \frac{h}{2} - C}{z_e}$$

La sección de empotramiento reaccionará con una compresión, C , en el hormigón, en la zona más próxima a la posición de la resultante de las cargas exteriores, y una tracción T en las armaduras más alejadas.

La visualización de la línea de acción de la resultante de V y H y la imagen de las reacciones H , C y T que demandan la condición de equilibrio, ayudan a comprender el dimensionamiento de la pila, la importancia de las armaduras necesarias, las características resistentes del hormigón que debe tener capacidad para transmitir el esfuerzo de compresión, V , más el de tracción T de las armaduras; la influencia de

desplazamientos de primer y segundo orden, los del neopreno de cabeza debidos a las deformaciones impuestas y a la carga horizontal H. El valor de las reacciones en los pilotes, que deben estar contrarrestados por la resultante de las tensiones generadas por las deformaciones, verticales y horizontales, del terreno en el que apoyan, dependerá de la posición de la reacción horizontal H. En el gráfico se han representado tres posiciones posibles:

- Posición I: La reacción se produciría esencialmente por el empuje pasivo de la zapata adyacente, lo que es más probable que pueda ocurrir cuando se hormigona el encepado contra el terreno y cuando la flexibilidad de los pilotes sea elevada.
- Posición II: La que se suele producir en zapatas directamente apoyadas en el terreno, sin pilotes, en las que la reacción horizontal H se genera en el contacto con el suelo y está limitada por el valor

$$H \leq \mu V$$

siendo μ , el coeficiente de rozamiento hormigón-suelo.

- Posición III: La más probable y coherente con las razones que motivaron la cimentación con pilotes. La reacción H se produce en profundidad debido a la coacción al desplazamiento horizontal de los pilotes que impone el terreno que los envuelve.

La excentricidad que, en cada caso, habrá que considerar será:

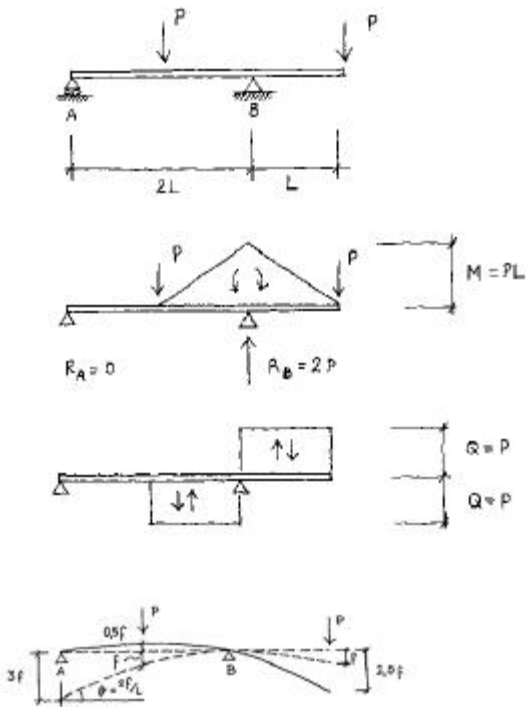
$$e_i = z_i \frac{H}{V} + \delta$$

y las reacciones en cada una de las dos filas de pilotes representadas, será:

$$R_A = \frac{P}{2} \left(1 + \frac{2e_i}{b} \right)$$

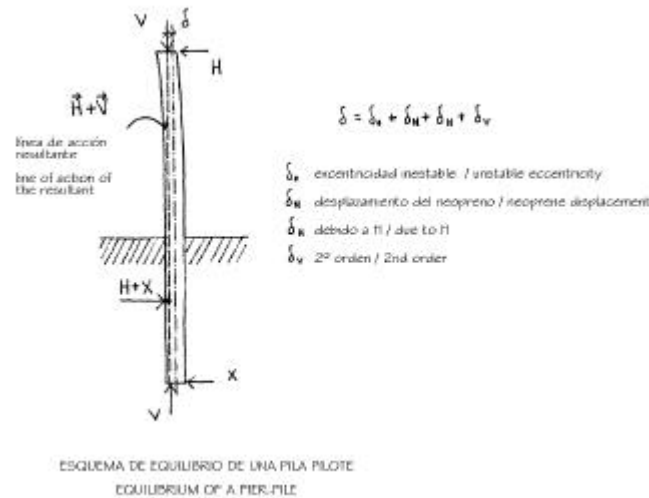
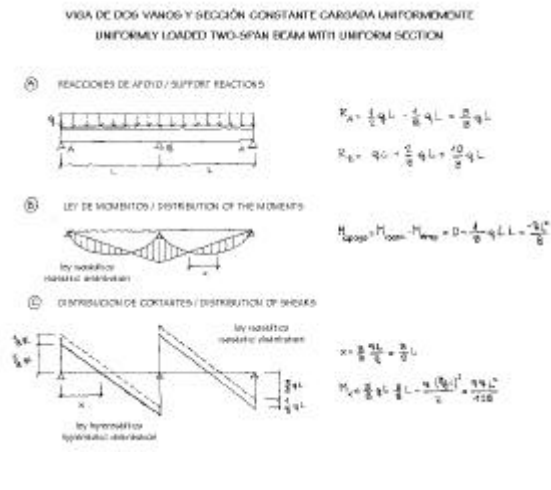
$$R_B = \frac{P}{2} \left(1 - \frac{2e_i}{b} \right)$$

Además, en el tercer caso, el pilote estará solicitado por un momento flector en el empotramiento que será inferior al esfuerzo horizontal absorbido por cada pilote multiplicado por la distancia a su empotramiento con el encepado.



Este elemental ejemplo recuerda que todas y cada una de las partes de una estructura deben estar en un equilibrio, igualándose acciones exteriores y reacciones que tienen que ser compatibles con el comportamiento de los materiales (terreno, hormigón o acero). Pone también de manifiesto la imperiosa necesidad de identificar el valor y la posición de las reacciones de apoyo y, previamente, identificar con rigor las acciones que las engendran.

La reflexión anterior es particularmente importante cuando se recurre a una estructura de apoyo del tipo pila-pilote, mucho más sensible que una más convencional de pilotes con encepados, a las incertidumbres en las acciones y a la posición de las reacciones en el terreno. (fig. 2-6) Consideremos ahora otro caso (viga de dos vanos iguales de sección



constante uniformemente cargada), en el que el conocimiento de las reacciones de apoyo, su origen y su evolución, nos facilita información muy valiosa sobre el comportamiento de la estructura y puede ser un eficaz instrumento de control de dimensionamiento, de ejecución de la obra y de ésta en servicio. (fig. 2-7)

Las reacciones de apoyo pueden considerarse como la suma de las que tendrían los dos tramos isostáticos e independientes ($R_A = q \frac{L}{2}$; $R_B = 2 \cdot q \frac{L}{2} = qL$) y la transferencia de reacciones de los

apoyos laterales al central, consecuencia de la continuidad impuesta ($\Delta R_A = -q \cdot \frac{L}{8}$; $\Delta R_B = +2 \cdot q \cdot \frac{L}{8}$). Dicha transferencia conlleva una redistribución de momentos flectores

$$\Delta M_B = \Delta R_A \cdot L = -qL^2/8$$

y de cortantes

$$\Delta Q_A = -\Delta Q_B = -qL/8$$

La ley de cortantes isostáticos se habrá desplazado y el punto de cortantes nulos quedará definido por la coordenada:

$$x = \frac{\frac{3}{8}qL}{\frac{1}{2}qL} \cdot \frac{L}{2} = \frac{3}{8} \cdot L$$

y el momento máximo en el vano, situado en la posición en la que el cortante se anula, valdrá:

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

El punto de momento nulo, por simetría, estará a $2x$ del apoyo lateral.

El conocimiento de las reacciones de apoyo ha permitido un análisis sencillo y fiable de la viga.

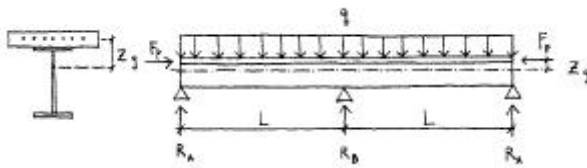
Consideremos ahora la misma viga continua de dos vanos cargada uniformemente, en estructura mixta de sección constante, y apliquemos una *fuerza de pretensado* en sus extremos por medio de cables rectos situados en el centro de la losa de hormigón a una distancia, z_g , del centro de gravedad de la sección mixta. (fig. 2-8)

Antes de la aplicación del pretensado, las reacciones de apoyo serán:

$$R_A = \frac{3}{8}qL; \quad R_B = \frac{1}{8}qL$$

Podemos plantearnos que la fuerza de pretensado aplicada, anule las reacciones laterales de la viga. Significaría que se había producido una transferencia de reacciones de los apoyos laterales al apoyo central, de manera que tras el pretensado:

$$R_{Ap} = \frac{3}{8}qL - \frac{3}{8}qL = 0 \quad \text{y} \quad R_{Bp} = \frac{1}{8}qL + 2 \cdot \frac{3}{8}qL = 2qL$$



El pretensado equivaldrá a un esfuerzo de compresión uniforme, F_p , en cada sección de la viga y un momento flector que será la suma del isostático

$$M_{pi} = F_p \cdot z_g$$

y del hiperestático que es inseparable de la variación o transferencia de reacciones de apoyo y que variará linealmente, desde cero sobre los apoyos laterales a un máximo sobre el apoyo central de:

$$M_{p.h} = -\frac{3}{8}qL \cdot L = -\frac{3}{8}qL^2$$

Como es sabido, o en todo caso puede fácilmente deducirse, el momento total, suma del isostático y del hiperestático, en el apoyo de la viga de dos vanos solicitados en sus extremos por un momento M , vale $-0,5 M$. Por tanto, el momento isostático será tal que:

$$F_p \cdot z_g - \frac{3}{8}qL^2 = -0,5 F_p \cdot z_g$$

luego

$$F_p \cdot z_g = \frac{qL^2}{4}$$

La ley de momentos y cortantes debidos a las cargas exteriores, será en definitiva la representada en los esquemas: (fig. 2-9)

En el apoyo central, tendremos:

$$M_B = -\frac{qL^2}{8} + \frac{qL^2}{4} - 1,5 \frac{qL^2}{4} \quad \text{y} \quad R_B = \frac{10}{8}qL + 2 \frac{3}{8}qL = 2qL$$

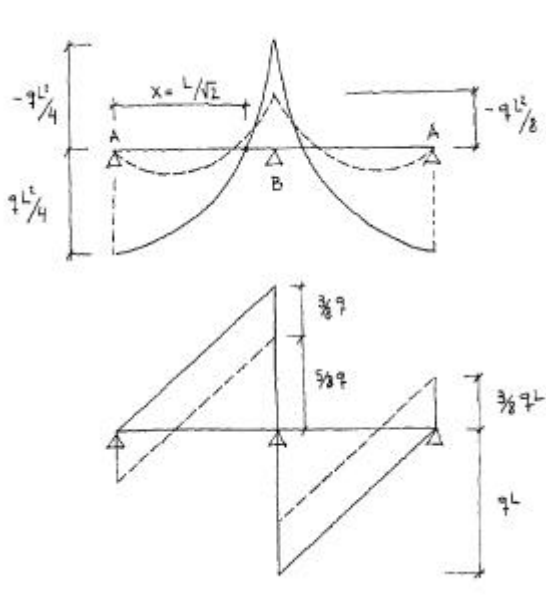
En el lateral,

$$M_A = 0 + \frac{qL^2}{4} = \frac{qL^2}{4} \quad \text{y} \quad R_A = \frac{3}{8}qL - \frac{3}{8}qL = 0$$

La ley de momentos flectores en los apoyos laterales, tendrá tangente horizontal al ser el cortante nulo y el momento, por tanto, máximo.

El punto de momentos nulos, donde se producirá el cambio de curvatura de la deformada, estará a una distancia x tal que:

$$\frac{qx^2}{2} = F_p \cdot z_g$$



luego

$$x = \frac{L}{\sqrt{2}}$$

Una de las consecuencias de este análisis basado en los valores de las reacciones de apoyos, es que el pretensado equivale a una acción exterior que produce reacciones hiperestáticas en las vigas continuas y una redistribución, por tanto, de las reacciones en los apoyos provocados por las acciones exteriores. Dicha redistribución depende de la geometría de los cables, de ahí que el pretensado se pueda considerar como una fuerza activa al servicio de un objetivo estructural: la optimización de las reacciones de apoyo para sacar el máximo partido, partido activo, a través de su geometría, a los materiales y a las formas de la estructura.

Aun cuando este ejemplo, corresponde a un caso poco utilizado en la práctica profesional, las observaciones realizadas pueden servir para analizar los efectos de otras acciones que provocan en la estructura una respuesta semejante.

Ello ocurre con la *retracción del hormigón* de la losa de la estructura mixta que estamos analizando. La retracción es una característica del hormigón originada por la pérdida del agua que no se ha combinado con el cemento, y que está afectada, entre muchos otros factores, por el ambiente de humedad o sequedad del ambiente.

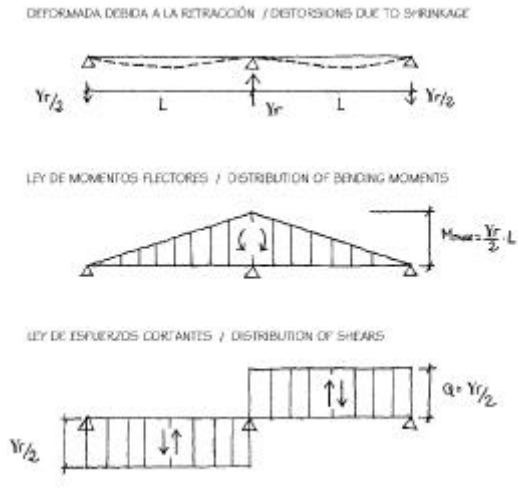
La retracción conlleva un acortamiento de la losa de hormigón, parcialmente coaccionada por la viga metálica a la que está conectada. El efecto intrínseco de la retracción, que se manifiesta en una viga mixta isostática, corresponde a una deformación impuesta, y al consiguiente estado de tensiones en cualquier sección que se tiene que autoequilibrar al no existir esfuerzos que las haya provocado.

Los bien conocidos diagramas de deformaciones, tensiones y esfuerzos resultantes autoequilibrados, son: (fig. 2-10)

La resultante de tracciones en el hormigón, T_h , consecuencia de la coacción interna que impone la viga metálica al acortamiento por retracción del hormigón, la de compresiones en el acero C_a y el resto de las tracciones T_a se autoequilibran, es decir, que se verifican simultáneamente las ecuaciones:

$$C_a = T_h + T_a$$

$$T_h \cdot z_h = T_a \cdot z_a$$



Si la deflexión general de la viga consecuencia de este estado de deformaciones y tensiones autoequilibradas están coaccionadas por la hiperestaticidad de la estructura, aparecen adicionalmente unos esfuerzos hiperestáticos que también deben autoequilibrarse.

En la viga de dos vanos tendremos una reacción positiva en el apoyo central y dos de signo contrario y de valor mitad en los apoyos laterales. (fig. 2-11)

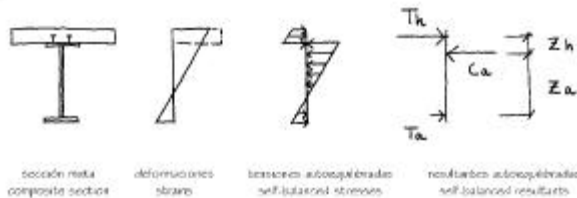
Los efectos hiperestáticos son análogos a los que se producen en el caso del pretensado que hemos visto anteriormente, porque a estos efectos, la retracción equivale a dos fuerzas de compresión, iguales y contrarias, aplicadas en el centro de gravedad de la losa y de valor:

$$F_r = \epsilon_r \cdot E_c \cdot A_c$$

área de la losa

modulo de elasticidad del hormigón

deformación unitaria de la retracción



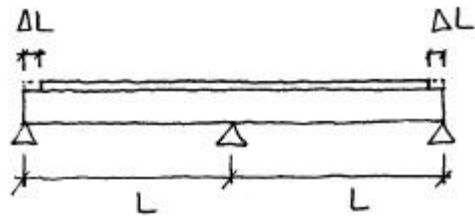
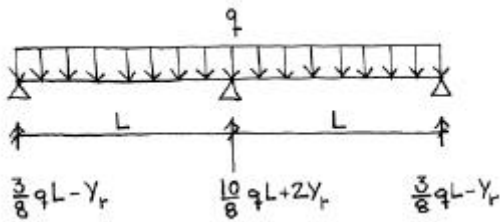
Los efectos hiperestáticos producidos por la fuerza de pretensado, F_p , o por la fuerza equivalente de la retracción, son similares. La diferencia está en los efectos isostáticos que en un caso corresponden a un estado deformacional y tensional equivalente a F_p y, en el otro, corresponde a un estado tensional autoequilibrado y a la deformación impuesta concomitante.

Por ello, la retracción produce también, en la estructura hiperestática, una transferencia de las reacciones de los apoyos laterales al central, de valor:

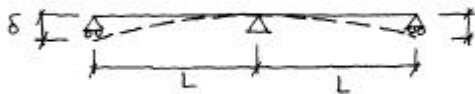
$$Y_r = -\frac{3}{2}(\epsilon_r \cdot E_c \cdot A_c) \cdot \frac{z_r}{L}$$

siendo z_r la distancia del centro de gravedad de la losa de hormigón al de la sección mixta completa.

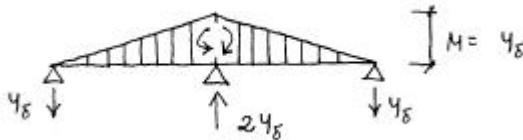
Las reacciones en la viga estudiada serán, por tanto: (fig. 2-12)



ASIENTO DIFERENCIAL / DIFFERENTIAL SETTLEMENT



LEY DE MOMENTOS FLECTORES / DISTRIBUTION OF BENDING MOMENTS



El *gradiente de temperatura* que se puede producir entre la losa de hormigón y la estructura metálica, tiene efectos similares a los de la retracción, y se añaden a los de éstos cuando el hormigón de la losa se enfría con relación al metal de la viga. (fig. 2-13)

El acortamiento unitario por el enfriamiento diferencial que se coacciona, es:

$$\varepsilon_T = \frac{\Delta L}{L} = \alpha \cdot \Delta T$$

siendo: α el coeficiente de conductividad térmica del hormigón, y ΔT el descenso de la temperatura en la losa.

El gradiente de temperatura produce también una transferencia de reacciones de los apoyos laterales al central, de valor:

$$Y_T = -\frac{3}{2} (\alpha \cdot \Delta T \cdot E_c \cdot A_c) \frac{z}{L}$$

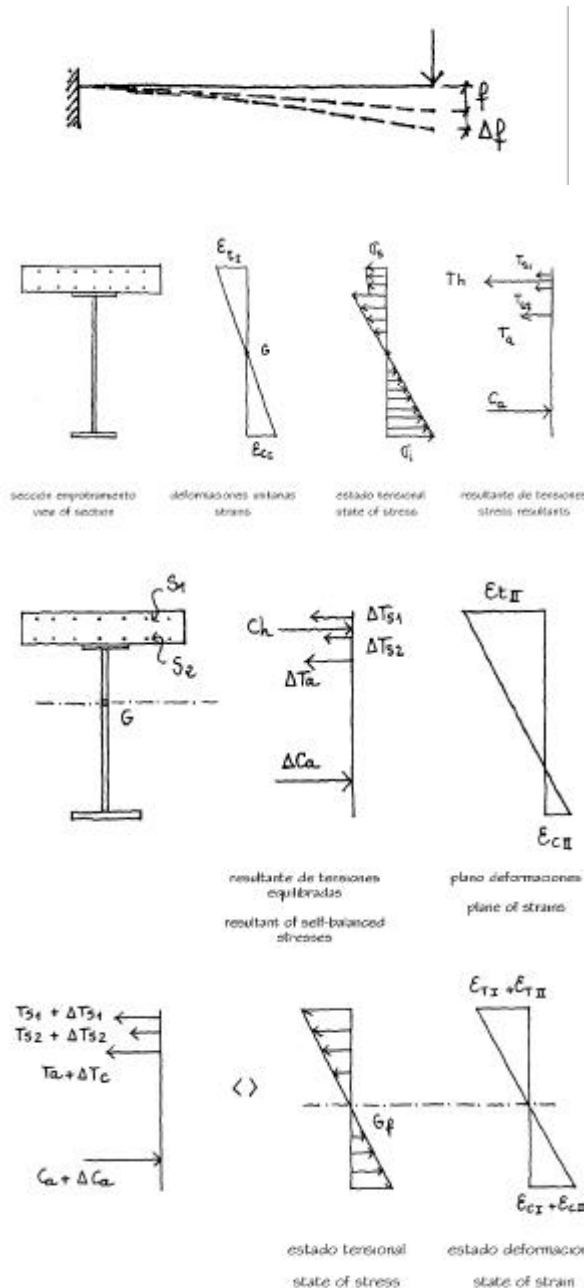
Los *asientos diferenciales* de apoyo en estructuras hiperestáticas, suponen también un reequilibrio de las reacciones de apoyo, que tienen semejanza con los efectos de pretensado, retracción y temperatura comentados, aunque se distinguen de ellos en que carecen de efectos isostáticos y solamente se producen los hiperestáticos. Supongamos que se produce un asiento, δ , diferencial y simétrico de los apoyos laterales con relación al apoyo central de la viga continua que estamos analizando. El esquema de flechas y momentos que resulta será el siguiente: (fig. 2-14)

El valor de la reacción del apoyo central generado por el asiento diferencial δ , será:

$$\frac{Y_\delta}{2} = \frac{3 E I \delta}{L^3} \text{ corregir}$$

Una parte, de valor $Y_\delta/2$, de las reacciones en los apoyos laterales provocados por las cargas exteriores, se transferirán al apoyo central por el mecanismo de flexión de la viga. El descenso diferencial de un apoyo equivale, pues, con todas las demás consecuencias, a una redistribución en las reacciones de apoyo.

Otra importante cuestión cuyo análisis se puede abordar por un camino similar, es el de la *fisuración del hormigón* traccionado sobre el apoyo central de la viga continua de dos vanos.



Planteemos con esta finalidad el comportamiento de una ménsula con la sección mixta que estamos considerando, y solicitada por una carga puntual creciente en un extremo. (fig. 2-15)

Justo antes de llegar a la carga de fisuración, la flecha de la ménsula será:

$$f = \frac{PL^3}{3EI}$$

Inmediatamente después de la fisuración, la flecha se habrá incrementado

$$f + \Delta f = \frac{PL^3}{3 \cdot (EI)_{cr}}$$

debido a la reducción de rigidez debida a la fisuración en la zona del empotramiento, siendo $(EI)_{cr}$ una forma de expresar un valor intermedio entre la rigidez de las secciones fisuradas y sin fisurar.

Inmediatamente antes de la fisuración, el hormigón de la losa estará traccionado y el esquema de deformaciones, tensiones y resultantes será: (fig. 2-16)

El hecho de la fisuración significa la anulación de las tracciones en el hormigón y, por tanto, su resultante T_h debe ser transferida en parte a la armadura de la losa, en parte al acero estructural y aparecerán también compresiones que autoequilibren la sección.

El esquema de las fuerzas generadas en el instante de la fisuración, será: (fig. 2-17)

La suma de los estados de tensiones y deformaciones antes de la fisuración y las redistribuciones que son consecuencia de ella, nos facilitará las del estado fisurado de la viga. (fig. 2-18)

Obsérvese que la resultante de tracciones G_h en el hormigón que se desvanece en la fisuración, no estará equilibrada exclusivamente por la sobretensión en las armaduras pasivas. La viga metálica también contribuirá a ello y tanto más cuanto menor sea la sección de armaduras, que estará limitada inferiormente por el control de las anchuras de fisuras y por las exigencias de flexiones localizadas. Por ello, el concepto tradicional de armadura mínima (aquella con igual o mayor capacidad para transmitir las tracciones que es capaz de resistir el hormigón) no es coherente con el comportamiento de una sección mixta. Dejemos apuntado, también, que la anchura de fisuras y su separación, estarán significativamente influidas por la posición y tipo de los conectadores en donde se concentran los esfuerzos rasantes que se transfieren de la losa armada a la viga y que, lógicamente, deben propiciar el inicio de fisuraciones, como también debe influir la

distancia entre armaduras transversales por ser concentradores del flujo de las tensiones de tracción antes de la fisuración.

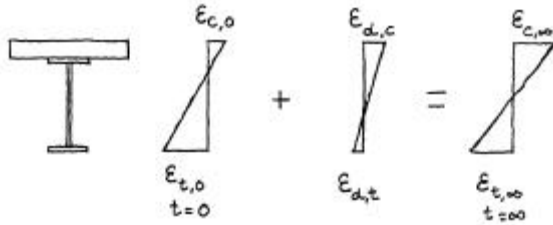
Pero volviendo al análisis de la estructura mixta en voladizo, esto es, isostática, hemos confirmado que la fisuración equivale a una deformabilidad adicional que se manifiesta por un estado de tensiones autoequilibrado que se añaden a las que se habrán generado en la sección, antes de fisurar, para equilibrar el momento $P \cdot L$ producido por la carga exterior aplicada. Es lo que ocurría también en las vigas isostáticas como consecuencia de la retracción y del gradiente de temperatura.

En el caso de la viga continua de dos vanos que estamos considerando, la deformabilidad adicional debida a la fisuración, estará parcialmente coaccionada por las reacciones de apoyo y, en consecuencia, también en este caso se generan reacciones, momentos y cortantes hiperestáticos que se adicionan a los efectos isostáticos. La fisuración también significa una transferencia de reacciones. En este caso se *debilita* la sección del apoyo central y, por consiguiente, parte de la reacción que soportaba antes de la fisuración se transfiere a los apoyos laterales que resultan más cargados. Es un proceso análogo a los que hemos visto anteriormente.

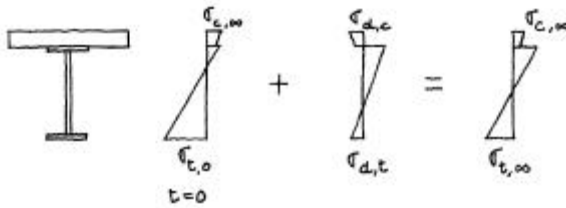
Hemos dejado para el final la reflexión sobre la *fluencia del hormigón* comprimido, esta hermosa expresión que nos recuerda que, las cargas mantenidas sobre una pieza de hormigón, producen con el paso del tiempo unas deformaciones adicionales o diferidas que se añaden a las que se produjeron en el instante de la puesta en carga. (fig. 2-19)

La evolución del plano de deformaciones y de las tensiones de la sección central de una viga isostática cargada uniformemente entre $t=0$ y $t=\infty$, será: (fig. 2-19)

Aunque no se han incrementado las cargas exteriores y siendo, por tanto, constante el momento flector en la sección central, se produce con el tiempo un incremento de deformación debido a la fluencia del hormigón comprimido de la losa. Dicho incremento debe generar un estado adicional de tensiones que se deben autoequilibrar al no existir incremento en el momento aplicado.



VARIACIÓN DE DEFORMACIONES UNITARIAS / CHANGE IN STRAINS



EVOLUCIÓN TENSIONES UNITARIAS / EVOLUTION OF STRESSES

A las deformaciones y tensiones iniciales ($t=0$) se añaden deformaciones diferidas y un estado de autotensiones equilibradas a medida que transcurre el tiempo.

Los efectos de la fluencia en una viga isostática son, por tanto, conceptualmente similares a los producidos por la retracción, el gradiente de temperatura y las otras acciones anteriormente consideradas. Y por ello, también en la viga continua se generan reacciones hiperestáticas debidas a la fluencia que supone una redistribución de las debidas a las cargas exteriores con el paso del tiempo.

Hay sin embargo una diferencia significativa que conviene destacar, porque en el caso de la fluencia, el origen de las reacciones hiperestáticas es el cambio relativo de rigideces que con el tiempo se produce a lo largo de la viga.

En efecto, la ecuación de la deformada de la viga para $t=0$, será:

$$v_0'' = \iint \frac{M}{(EI)_0} dx$$

Si, debido a la fluencia, las rigideces de las secciones varían con el tiempo pero su relación fuese constante, esto es,

$$\frac{(EI)_\infty}{(EI)_0} = k$$

la deformada a tiempo infinito sería homotética con la anterior.

$$v_\infty'' = \iint \frac{M}{(EI)_\infty} dx = k \iint \frac{M}{(EI)_0} dx$$

Pero esta mayor deformabilidad no conllevaría cambios en la ley de momentos, ni consiguientemente en la de cortantes y en las reacciones de apoyo.

En general, sin embargo, la relación de rigideces no se mantendrá constante, pero su variación no será suficiente para producir una transferencia significativa en las reacciones, que en el caso de la fluencia variarán, en general, muy poco aun cuando las flechas se incrementen significativamente.

En resumen, todas las acciones analizadas generan estados tensionales y deformacionales en estructuras isostáticas y, consiguientemente, efectos hiperestáticos en las que son continuas, que se manifiestan por los cambios que se producen en las reacciones de apoyo. (fig. 2-20)

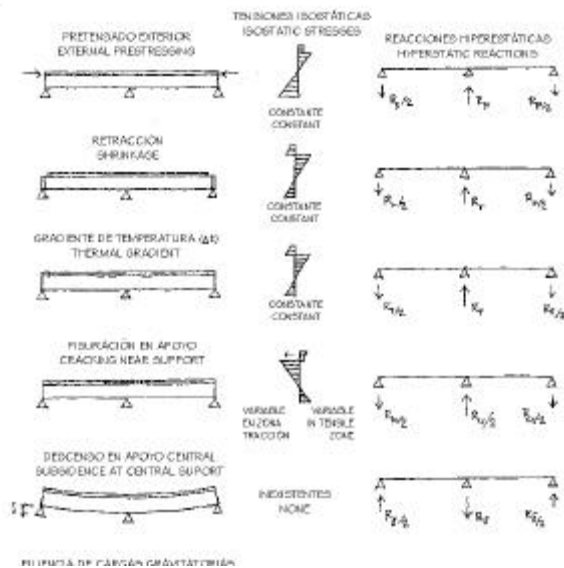
Tanto las acciones exteriores (cargas gravitatorias, pretensado, descenso de apoyos) como las que se generan a nivel de sección y que se pueden caracterizar por un estado equivalente de tensiones autoequilibradas (retracción, gradiente de temperatura, fisuración, fluencia), producen las mismas reacciones totales en la viga de dos vanos uniformemente cargada,

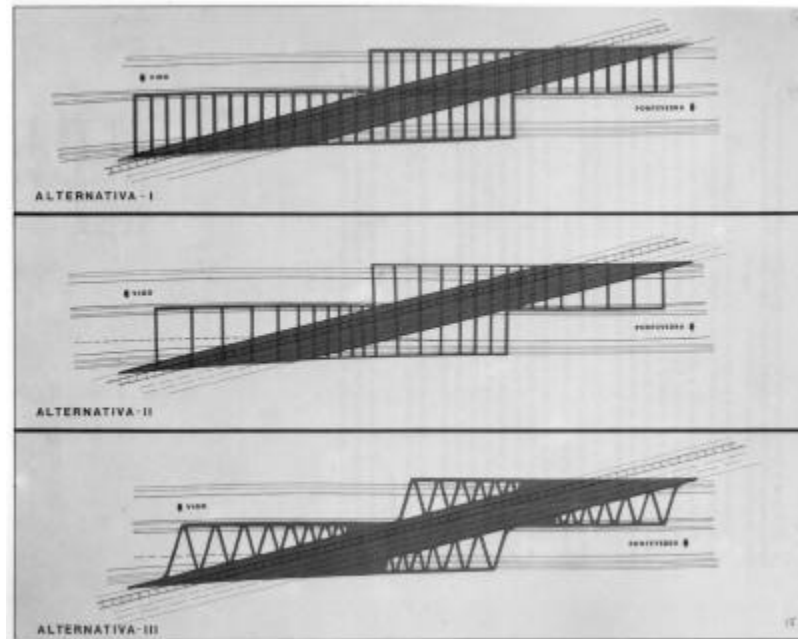
$$\Sigma R = R_A + R_B + R_A = 2qL$$

Sin embargo, cada acción produce una redistribución de las reacciones cuyo conocimiento es esencial para evaluar la importancia absoluta y relativa de la acción y cuantificar sus efectos. Como corolario, si se conocen los cambios en las reacciones de apoyo, podremos identificar la causa o causas que los han provocado, y estaríamos en condiciones de evaluar con rigor sus consecuencias, ya que habríamos eliminado los factores de incertidumbre que intervienen en la determinación de las sollicitaciones, y quedarían solamente los que influyen en la evaluación de la respuesta estructural que tienen un menor grado de variabilidad.

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. Y durante la ejecución de la estructura y con ella en servicio, hay que recordar que el control de reacciones de apoyo resulta un parámetro eficazísimo para confirmar las previsiones en cuanto al comportamiento de la estructura. Y esto es tanto más cierto cuanto mayor sea la complejidad de la estructura que estamos analizando.

Reflexiones de esta naturaleza, esto es, la consciencia de la importancia de la localización de apoyos para armonizar sus reacciones y equilibrar visualmente la estructura, nos sirvieron para concebir en 1978 un puente de ferrocarril con un gran esviaje sobre la Autopista del Atlántico, en el noroeste peninsular. Los esquemas de las plantas muestran la evolución desde el concepto de tablero-pérgola tradicional a la losa-celosía con apoyos en sus vértices, que fue la solución que ha quedado construida. (fig. 2-20b)





Hormigón y Acero nºs 130-131-132 / 1979

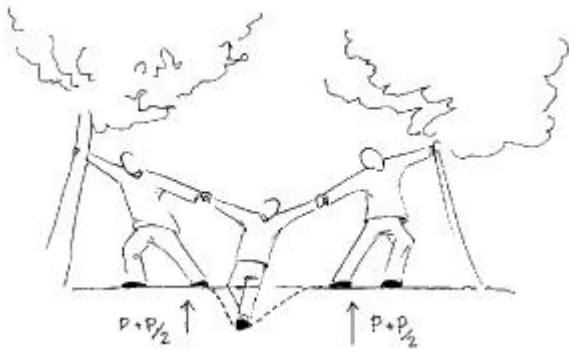
Es cierto, sin embargo, que muchas de las dificultades e incertidumbres inherentes al hiperestatismo estructural, se evitarían concibiendo estructuras isostáticas. Tampoco, a este respecto, la comodidad es una buena consejera. Porque el hiperestatismo, más complejo e incierto de análisis, puede mejorar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

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

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

“Es magnífico 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 sometidos 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?

Nos hemos referido, asimismo, a la fluencia del hormigón, esa peculiaridad que lo hace más humano. Las cargas permanentes que comprimen el hormigón, producen una deformación inmediata cuando son aplicadas y una deformación adicional que se va produciendo con el paso de los años. Así también sucede al hombre. El efecto de una carga mantenida se hace sentir más y más con el paso del tiempo si continúa actuando sobre nosotros. Vamos aumentando nuestra deformación y al hacerlo manifestamos nuestro cansancio y demandamos ayuda para poder continuar soportando la carga.

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. (fig. 2-21)

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. Quizás, por ello, la sabiduría estructural tenga, como tantas otras, raíces griegas, y podamos hablar con propiedad de analfabetismo estructural al referirnos a ignorancias de esta índole.³¹

Desde hacía mucho tiempo era conocido que los materiales cuando estaban sometidos a ciclos alternados de tensiones, tenían menor capacidad resistente que la estimada mediante ensayos estáticos de tracción. En el siglo XIX la Revolución Industrial nos trajo el maquinismo y proliferaron piezas, ejes de motores por ejemplo, solicitados por ciclos tensionales, cuya rotura se producía para valores significativamente inferiores de lo esperable.

En particular, el desarrollo del ferrocarril trajo consigo un insospechado número de accidentes. En Gran Bretaña a mediados del siglo pasado se contabilizaban unos doscientos fallecimientos anuales como consecuencia de descarrilamientos, generalmente provocados por rotura de carriles, ejes o ruedas.

En la gacetilla semanal que se publicaba en la prensa de la época (1887) se podía leer, por ejemplo:

“El accidente de ferrocarril más serio que se ha producido esta semana sucedió el 23 de Mayo. La rotura de una rueda provocó la muerte de seis personas.”

EL ALFABETO / GREEK ALPHABET

Alpha	Α α	Iota	Ι ι	Rho	Ρ ρ
Beta	Β β	Kappa	Κ κ	Sigma	Σ σ
Gamma	Γ γ	Lambda	Λ λ	Tau	Τ τ
Delta	Δ δ	Mu	Μ μ	Upsilon	Υ υ
Epsilon	Ε ε	Nu	Ν ν	Phi	Φ φ
Zeta	Ζ ζ	Xi	Ξ ξ	Chi	Χ χ
Eta	Η η	Omicron	Ο ο	Psi	Ψ ψ
Theta	Θ θ	Pi	Π π	Omega	Ω ω

Rankine, Poncelet, Wholer y tantos otros investigaron el origen de este problema. Los ingenieros franceses hermanos Marc y Paul Seguin, grandes especialistas en puentes colgantes, llamaron la atención sobre el problema en escritos basados en investigaciones cuyos resultados se publicaron en 1826.

En el siglo XIX se produjo un salto excepcional e irreversible en la rapidez con que se fabricaban bienes, y en la velocidad a que se podían transportar personas y bienes. La conquista de la velocidad, o lo que es análogo, el germen de la desaparición de la distancia, trajo también consigo el descubrimiento de la fatiga, de sus causas, y de las medidas para reducir su frecuencia y mitigar sus consecuencias.

El conocimiento es el mejor aliado del progreso. Y uno de los episodios destacados en el campo estructural, que se produjo ya avanzado el siglo XX, fue el de la utilización de la técnica de la soldadura para materializar las uniones entre los diferentes elementos que componen una estructura de acero. La esencia de la soldadura es la aplicación de un intenso foco calorífico capaz de fundir los bordes de las piezas que se tratan de unir, para que al enfriarse las zonas fundidas se integren dando continuidad a las dos piezas, que habrán quedado soldadas. La aplicación del foco de calor y su rápido enfriamiento tenían unas consecuencias inicialmente poco conocidas, pero que se manifestaron con roturas inesperadas de estructuras soldadas solicitadas dinámicamente.

La inesperada rotura de algunos puentes proyectados con uniones soldadas, intensa e inciertamente solicitadas, concebidos por el ingeniero belga Vierendeel cuyo nombre se identifica con ese delicado tipo de estructuras que se utilizan con relativa frecuencia, aunque no siempre acertadamente, anunció problemas anteriormente conocidos. Como ocurrió también cuando de los 2.500 buques, tipo Liberty, contruidos mediante soldadura y utilizados durante la II Guerra Mundial, 145 rompieron bruscamente y otros 700 sufrieron graves daños.

La trascendencia de este tipo de accidentes y los quebrantos económicos que llevaban consigo, atrajo la atención prioritaria sobre un problema entonces vagamente identificado e insuficientemente conocido.

Hoy es mucho lo que se sabe sobre esta cuestión, mucho lo que queda por saber y mucho lo que aún falta para poder llevar a la práctica diaria los conocimientos adquiridos.

Son numerosos los factores que influyen en la génesis de las tensiones en una estructura y en la cuantificación de su distribución especial:

- 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

Todas estas causas, cada una con su grado de incertidumbre, pudiendo combinarse en forma y proporciones muy variadas, conducen a un panorama tensional imposible de determinar y del que, sin embargo, depende el comportamiento del material estructural y, por tanto, de la estructura.

Al ser tantos y tan variados los factores que intervienen en el comportamiento estructural y que pueden propiciar su rotura por fatiga, es lógico tratar de jerarquizar influencias y separar el polvo de la paja, procurando identificar entre las causas más importantes, aquellas que pueden ser cuantificables con más facilidad y precisión.

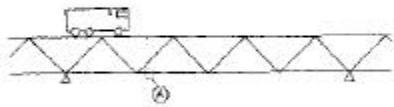
Conformémonos aquí con señalar que, en el caso de los puentes metálicos, se han identificado las variaciones de tensión provocadas por las sobrecargas y el número de veces que actúan sobre la estructura como las causas más determinantes de las roturas por fatiga. Y que, por ello, ha sido necesario definir una sobrecarga “modelo” que sea representativa y un sistema para sustituir los complejos estados tensionales que resultan, diferentes en cada punto de una estructura, por una variación de tensión, $\Delta\sigma$, que se repite el número de veces, n , que la “sobrecarga modelo” actúa sobre la estructura.

En síntesis, el procedimiento que actualmente se utiliza para verificar la fatiga en los puentes metálicos es: (fig. 3-2)

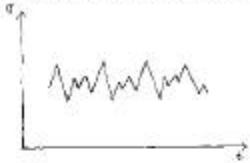
- se establece un modelo de carga

MODELIZACIÓN DE LA FATIGA ESTRUCTURAL MODEL OF STRUCTURAL FATIGUE

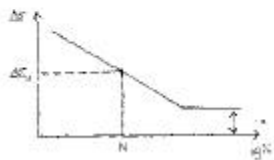
MODELO DE CARGAS / LOAD MODEL



HISTORIA TENSIONAL (punto A) / STRESS HISTORY AT A



COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL / MATERIAL BEHAVIOUR



línea de resistencia
endurance line

$$\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

- 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 repite 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.

Conviene señalar que este planteamiento está claramente influido por el enfoque de la fatiga en la ingeniería mecánica, en la que suele ser mucho más clara la existencia de ciclos de tensiones que se reparten en el tiempo. En la ingeniería estructural el problema es más complejo y, por tanto, queda amplio espacio para profundizar en lo que hacemos.

En cualquier caso, cambiando ya el enfoque de nuestra reflexión, este planteamiento que nos dice que los factores más determinantes en la fatiga son la variación de tensión, **Ds**, y el número de ciclos, **n**, que se repiten, parece razonable, por cuanto es la percepción que tenemos del origen de la fatiga en el ser humano.

En efecto, a los seres humanos, como a los materiales con los que construimos nuestras estructuras, les fatigan más las variaciones de tensión que la importancia de su valor absoluto. La vida nos solicita e induce en nosotros un estado tensional que, cuando se mantiene constante, nos habituamos a él y pasa prácticamente desapercibido. Es la variación de tensión lo que percibimos realmente y la que nos fatiga. Los cambios en el entorno que nos afectan, su amplitud, la rapidez con que se producen, la frecuencia con que se van repitiendo, son otros tantos factores que influyen en nuestro cansancio. En el deporte esto se percibe con claridad. Las aceleraciones en una carrera de atletismo, en una competición ciclista, producen un desgaste acelerado en el organismo del atleta. Y el atleta o ciclista llega a meta más fatigado cuando se ha corrido *a tirones* que cuando se ha corrido *a tren*, aunque en ambos casos se haya tardado el mismo tiempo.

COMO en las estructuras, tampoco es posible cuantificar la fatiga del ser humano. Y en vista de ello, en las personas como en las estructuras, tratamos de encontrar parámetros que se puedan medir y que sean un índice del cansancio. Así ocurre, por ejemplo, con la medida del nivel de ácido láctico del que, sabe que está relacionado con la fatiga. Y para estudiar las aptitudes de un atleta, se hacen estudios de sensibilidad sometiénndole a pruebas en las que se hace variar la intensidad, duración

y naturaleza del esfuerzo. O se evalúa su respuesta a esfuerzos continuados o alternados para optimizar su preparación a la vista de los resultados y establecer, asimismo, la estrategia de competición más adecuada para su organismo.

No cabe duda, también, que, como en las estructuras, es dudosa la precisión con que los modelos simplificados que se utilizan al analizar el comportamiento de los atletas (en condiciones equivalentes a las de laboratorio), reflejan el comportamiento del organismo estudiado en la realidad de la competición, en unas condiciones climatológicas diferentes y que pueden ser muy variables (sol, lluvia, viento, temperatura), en una situación ambiental distinta (la presión, por ejemplo, del público que asiste a la competición y que tanto parece influir con sus ánimos al insuflar energía a los competidores... que portan sus colores), en una orografía distinta, en una situación en la que el cansancio del día se suma amplificado al que persiste de competiciones precedentes...

También en la vida normal, las personas se ven afectadas por la importancia de las variaciones de las tensiones a que están sometidas, por la amplitud de dichas variaciones y por la frecuencia con que suceden más que por su magnitud. Porque en las personas, como en las estructuras, el número de los ciclos que podemos soportar sin romper, depende de su amplitud y así tendríamos, en los dos extremos del panorama, la fatiga de bajo número de ciclos y la fatiga de alto número de ciclos, quizás la más tradicional dado el origen mecánico del concepto. En general, en esta reflexión podremos utilizar indistintamente la palabra tensión o deformación en la medida en que los materiales y las estructuras (y los seres humanos) sobre los que estamos reflexionando, tengan un comportamiento puramente elástico. Si las variaciones de tensión o deformación fuesen muy elevadas, sería muy reducido el número de ciclos que produciría la rotura. De hecho, con las habituales hipótesis elásticas, solamente tendríamos capacidad para superar una sola vez el límite elástico del material. Si la amplitud de la variación tensional fuese muy pequeña, el número de ciclos sería, por el contrario, muy alto, tanto es así que las ordenadas de los diagramas **Ds-n** característicos, tienen escala logarítmica y la expresión que relaciona ambos parámetros es del tipo:

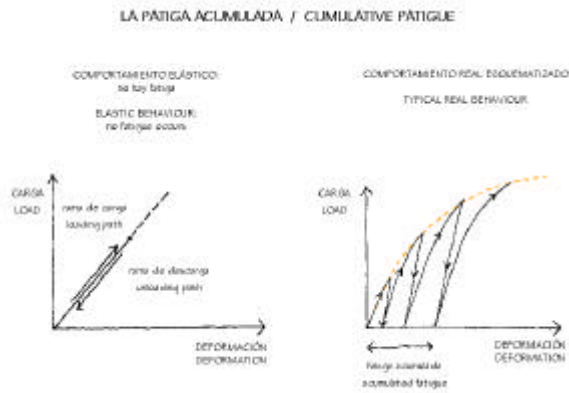
$$\Delta \sigma = k \left[\frac{2 \cdot 10^6}{n} \right]^{1/2}$$

En algunos materiales, como el acero, se identifica un valor $\Delta \sigma$ por debajo del cual no se produce fatiga: es el *límite de fatiga*, que también se suele llamar *límite de endurance*. Análogamente sabemos que cuando se solicita a una persona con pequeñas tensiones variables muy alejadas de la máxima tensión estática que puede soportar, las variaciones de tensión no le afectan, y es la magnitud de la tensión habitual la que determina la calidad y cantidad de su vida.

Otro concepto que hay que subrayar es el de la acumulación de fatiga. Es obvio que existe, por cuanto estamos considerando que los comportamientos dependen del número de veces que se repite el esfuerzo que genera la variación de tensión. Tenemos, quizás, los seres humanos como las estructuras, un depósito imaginario en el que vamos acumulando nuestro cansancio. Y con el paso del tiempo el depósito se va llenando y un día no podremos continuar fatigándonos porque tendremos el depósito lleno.

En las estructuras, aunque las construyamos con el mismo material, las dimensiones del *depósito de fatiga* varían según como hayamos concebido su tipología y sus detalles. Existe una capacidad *innata* que podemos decir que depende del material y otra capacidad *adquirida*. También la capacidad de fatigarse del ser humano es en parte *innata* y está, en parte, influida por la educación y las condiciones en que nos hemos desarrollado.

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 consciencia 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.



No se puede concluir este apartado sin observar la contradicción que supone el concepto de *acumulación de fatiga* en materiales y estructuras con un hipotético comportamiento puramente elástico. La esencia de dicho comportamiento consiste en que cuando se elimina la carga que ha provocado tensiones y deformaciones, el material y la estructura recuperan su condición original sin que queden restos del esfuerzo.

Podríamos, a estos efectos y renunciando al rigor, esquematizar la imagen de la fatiga acumulada provocada por las cargas, en los gráficos siguientes. (fig. 3-3)

Supuestos comportamientos puramente elásticos, las ramas de descarga coinciden con las de carga, y la estructura o persona descargada volverá a la posición inicial sin que queden rastros 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, y si la insensatez del dopaje no es una forma de suicidio del que lo experimenta en su organismo y una forma de asesinato cometido por quienes fomentan su utilización.

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”*. La serena alegría con que ha recibido el premio Nobel no ha acelerado los latidos del suyo, para alegría también de los que deseamos que viva mucho tiempo.

AFORISMO CUARTO

No es posible conocer el estado tensional de una estructura.

Pues sí que estamos buenos. Tan importante como parece que es conocer con precisión el estado tensional de una estructura, y poder evaluar y controlar a través de su análisis la respuesta a las acciones exteriores a las que puede estar sometida, se plantea la imposibilidad de hacerlo. La cuestión que nos plantea este aforismo es particularmente importante por cuanto una enorme cantidad de estudios e investigaciones y una parte significativa del tiempo que en la práctica se consume en los cálculos, parece tener por objetivo la determinación del estado tensional de la estructura.

Hasta hace relativamente poco tiempo, todos los cálculos eran deterministas y se aceptaba en los reglamentos en vigor, el comportamiento puramente elástico de materiales y estructuras. 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 totalismos deterministas y, probablemente, con el declinar de todos ellos) los conceptos probabilistas se empezaron a abrir camino. Los métodos de cálculo, es decir, los procedimientos que permitían modelizar el comportamiento de nuestras estructuras, y que se basaban hasta entonces en la *teoría de las tensiones admisibles* en la que se englobaban todas las incertidumbres en un único coeficiente, dicho de seguridad, empezaron a evolucionar. La teoría más moderna de los *estados límites* era conceptualmente probabilista, aunque no había datos suficientes y continúa sin haberlos, para llevarla a la práctica con generalidad. (fig. 4-1)

Lo cierto es que la metodología probabilista de las verificaciones estructurales, venciendo hábitos y comodidades intelectuales, se fue progresivamente 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 y a un mejor conocimiento de las variables que intervenían en los comportamientos estructurales y a la identificación





Puente en el Estuario de Cleddau (Milford Haven) REINO UNIDO
Bridge on the Cleddau Estuary (Milford Haven) United Kingdom

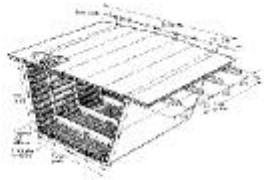
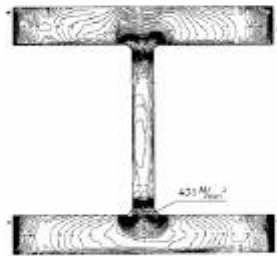


DIAGRAMA DE TENSIONES RESIDUALES



PERFIL LAMINADO 14 W 25 x 281 soldado

de los diferentes objetivos que se persiguen al proyectar y construir una estructura, y a su deslinde sin, por ello, encerrarlos en departamentos estancos. Una de las consecuencias que se derivó de todo ello fue la consciencia, crecientemente extendida, de que el comportamiento de materiales y estructuras era más complejo y más rico que los supuestamente elásticos y lineales, que de ser ciertos, permitirían adivinar el porvenir. Razón de más para constatar que no pueden serlo. Y al no serlo se ponía en entredicho la bondad de los cálculos tensionales, y la realidad de los valores de las tensiones calculadas que se venían utilizando como el centro de un universo sobre el que giraban todos nuestros desvelos estructurales. Dicho en forma muy breve y un tanto literaria, los nuevos planteamientos transportaban el germen de la duda tensional.

Pongamos para alimentarla dos ejemplos. En el primero, el más conocido, se muestra el estado de tensiones residuales de un perfil metálico constituido por un alma soldada a las alas. Antes de ser solicitado por carga exterior alguna está sometido a tensiones que se autoequilibran, pero que presentan puntas próximas a su límite elástico, $f_y=420 \text{ N/mm}^2$. (fig. 4-2)

Recordemos, también, que una de las operaciones más frecuentes que se realizan en un taller de estructuras metálicas con los perfiles antes de ensamblarlos, es proceder a su enderezado, lo que lógicamente se logra sometándolo a deformaciones plásticas que permanecen parcialmente después que se ha eliminado la causa que las han provocado. Es imprescindible para ello la existencia de un estado de tensiones, autoequilibrado, provocado por el enderezado de la pieza.

El otro ejemplo corresponde a las tensiones medidas, en un valioso trabajo de investigación, durante los procesos de ensamblaje por soldadura de una dovela metálica durante la construcción del puente de Cleddan en el Reino Unido. (fig. 4-3 + 4-4)

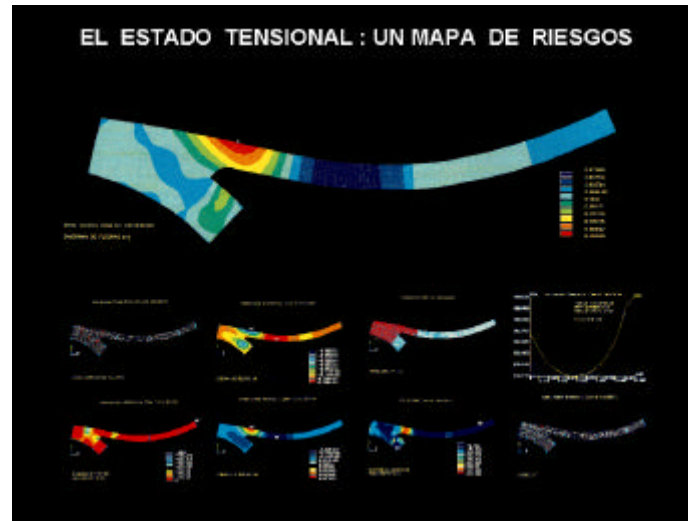
¿Habría alguien capaz de acertar *a priori* los valores tensionales que fueron medidos en los controles realizados durante la fabricación? En el documento del que se ha tomado estos datos (Ciriá, Technical note 110), se incluyen muchos otros resultados de tensiones medidas que confirman la práctica imposibilidad de predecir la distribución y valores extremos que se producen para un determinado proceso de fabricación por soldadura.



Ahora, probablemente, se comprende mejor la rotundidad del aforismo, porque realmente no es posible conocer el estado tensional de una estructura y, como corolario inevitable, no es imprescindible el hacerlo. Para evaluar la seguridad de la estructura, basta modelizarla adecuadamente y comparar las solicitaciones provocadas por las acciones exteriores (y las reacciones de apoyo que las equilibran) con la capacidad resistente de la sección solicitada, aplicando a un lado y a otro de la ecuación que las compara, los coeficientes de seguridad que engloban las incertidumbres inherentes a cada determinación. Como es natural, mucho se podría hablar sobre esta cuestión, pero para lo que aquí se trata, basta decir que la variabilidad en los valores de la capacidad resistente de una sección es mucho menor que la que conlleva la determinación de un estado tensional, aunque su integración debe coincidir con aquélla. Los estados tensionales autoequilibrados no influyen en la resistencia, siempre que el material y la estructura no tengan un comportamiento elástico acotado. En el perfil metálico al que nos hemos referido, construido con un material noble como el acero, su momento resistente estará muy próximo a $M_R = f_y \cdot W_p$, siendo f_y el límite elástico del material (valor con variabilidad reducida y garantizada) y W_p , módulo plástico que depende exclusivamente de la geometría garantizada del perfil.

Pero además de la seguridad, hay que verificar que la estructura pueda cumplir las funciones para las que se ha proyectado primero y construido después. Por ello, hay que verificar su geometría para las diferentes cargas que pueden actuar sobre ella, evaluar sus potenciales vibraciones, controlar (que no evitar porque son inevitables), las fisuras en el hormigón estructural... Y para ello no necesitamos conocer las tensiones en la estructura. Lo que sí se puede conocer con unos márgenes razonables, son las variaciones tensionales inducidas por una carga determinada de magnitud acotada. Y ese conocimiento, que no es un fin en sí mismo, puede ser un instrumento valioso para verificar el comportamiento estructural, como hemos visto al tratar de la fatiga.

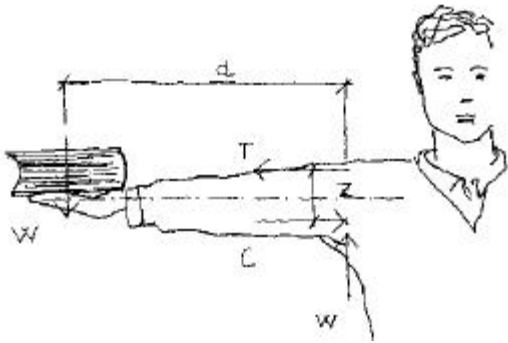
Los gráficos tensionales y deformacionales, como los que corresponden a un caso real, pueden considerarse como *mapas de riesgos* que aportan, al observador preparado, importante información sobre el comportamiento de la estructura analizada.(4-5)



Mirando por el espejo retrovisor de la memoria, puedo recordar el tiempo que consumía la búsqueda y captura de prohibidas tensiones de tracción en unas estructuras de hormigón postensado, que en ocasiones se fisuraban sin que en los cálculos se hubiesen detectado tracciones. Y las que no lo hacían, no era, desde luego, porque los cálculos fuesen más precisos o fiables que los realizados para sus hermanas fisuradas. Estábamos confundiendo los cálculos con la realidad, el fin con los medios, porque teníamos equivocado el enunciado del problema.

Tampoco es posible conocer el estado de tensiones, ni físicas ni psíquicas, que acampan en el ser humano, y no hay instrumentos científicos capaces de medirlos. Los análisis clínicos sobre muestras del ser que nos facilitan datos muy valiosos sobre la constitución de un cuerpo, equivalen a los análisis para estudiar la composición de un hormigón o un acero a partir de muestras tomadas de las estructuras. Y es más valiosa la información sobre la variación de los parámetros analizados como síntoma de una enfermedad y como base para su remedio. Pero son variaciones objetivas que se suman a otras que no

TENSIONES EN EL SER HUMANO
STRESSES IN THE HUMAN BODY



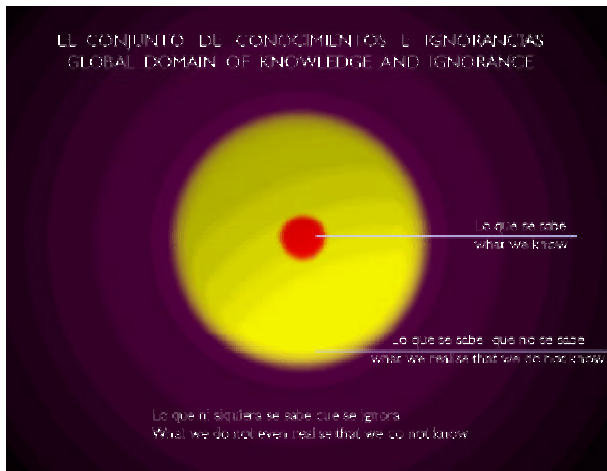
percibimos, que no somos capaces de medir o cuya influencia no somos capaces de discernir. En cualquier caso, en el ser humano como en las estructuras, se requiere una percepción global porque son muchos los factores que influyen y que, a veces, se exteriorizan para el observador atento, al que, por ejemplo, es más probable que perciba un cambio de estado de ánimo o el cambio en una característica física, que las causas que lo han provocado. Los efectos se suelen percibir mejor que las causas y la percepción de aquéllos suele ser el preámbulo para la identificación de éstas.

En el ser humano como en las estructuras, 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, W , 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, T , en los músculos y una compresión, C , 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. (fig. 4-6)

AFORISMO QUINTO

Los ingenieros somos gestores de incertidumbres.



Alguien ha definido la vida, antes que ahora, como el arte de tomar decisiones acertadas a partir de datos insuficientes. Otro tanto ocurre en la ingeniería estructural. Nunca es suficiente el tiempo que tenemos para recopilar todos los datos disponibles, que nunca serán todos los que influyen, ni poseemos todos los conocimientos que serían necesarios, ni las condiciones suelen propiciar el uso de todos los que, entre los que tenemos, pueden contribuir al acierto de la decisión que tomamos. Acierto que, por otra parte, no siempre es posible confirmar porque las consecuencias de nuestra decisión se dispersan en una pléyade de acontecimientos que las enmascaran.

En un interesante plano de actualidad titulado *“El ingeniero falible”*, publicado en “New Scientist” el 2 de noviembre de 1991, su autora, la australiana Sharon Beder, atribuye la un antiguo presidente de la rama escocesa de la prestigiosa Institución Británica de Ingenieros Estructurales, la frase siguiente:

“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 amplitud de nuestra ignorancia.”

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

Máximo sintetizaba hace algún tiempo, en una de sus sabias viñetas que suelen adornar 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. (fig. 5-1)



Las dimensiones de las dos primeras parcelas, aunque finitas, son suficientemente grandes para que ni el más sabio haya podido llenarlas a lo largo de su vida. El proceso de génesis y acumulación de conocimientos, es estimulado por la consciencia de nuestra ignorancia y la consiguiente transferencia del inmenso tercer espacio al segundo, se produce si se tiene la necesidad material o espiritual de aprender, que a lo que dijo Ortega, es la condición para hacerlo. En ocasiones, el relámpago del conocimiento (acompañado por un musical ¡Eureka!) se instala en nosotros sin que hayamos sido conscientes de esta posibilidad: es el paso directo del tercer espacio al primero sin detenerse en el segundo.

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

Y es ley de vida y ley de la ingeniería también, que los únicos conocimientos que no utilizamos son los que no tenemos. Que los que forman parte de nuestro patrimonio intelectual, de una u otra forma, influyen en nuestras decisiones y en nuestros comportamientos.

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

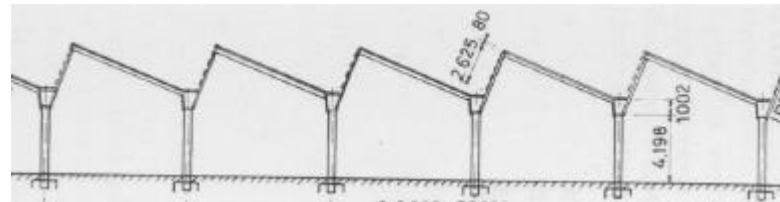
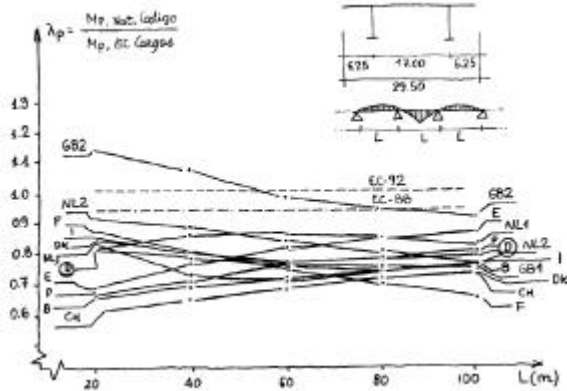
Para ilustrar solamente un aspecto del mar de incertidumbres por el que debemos navegar, mostremos un gráfico panorama del origen de las cargas que actúan sobre nuestras estructuras. (fig. 5-2)



Representemos, como ejemplo, el gráfico de las velocidades del viento medido en un punto determinado, de un edificio determinado, situado en una posición determinada, en un tiempo muy reducido. 5-3

La variación de la velocidad es uno de los parámetros que influyen en el efecto del viento sobre una construcción, pero no el único. La geometría del objeto transforma le velocidad en empujes de muy variados valores y sentidos. La geometría del ala de un avión es un manifiesto ejemplo de ello. El flambear de banderas y las hojas de los árboles mecidas o enloquecidas por las ráfagas de viento, también nos lo recuerda.

La carga de la nieve y el hielo sobre una edificación depende de la geometría de las cubiertas, de la situación topográfica, de los vientos dominantes y de otros factores. El esquema de una nave en dientes de sierra, en la que el viento ha acumulado la nieve en las limahoyas y ha dejado calvas de nieve las limatesas, expresa las dificultades a las que nos enfrentamos para modelizar con realismo y eficacia los efectos de la nieve y del viento sobre nuestras construcciones. (f.5-4)



Tenemos además que evaluar la influencia de la temperatura y de la humedad. Y hay que cuantificar los pesos de los materiales (esto es, su densidad y la distribución geográfica de masas), y decidir las sobrecargas que vamos a introducir en el modelo de cálculo para simular las que realmente pueden actuar a lo largo de la vida de la estructura. A este respecto, es instructivo representar el gráfico que expresa las sobrecargas tan diferentes con las que reglamentariamente hay que dimensionar los puentes en diferentes países europeos. (fig. 5-5)

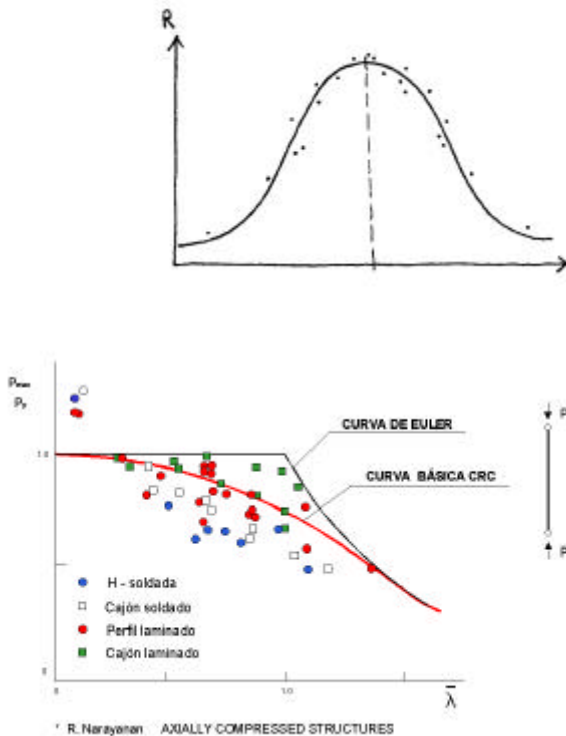
Una vez decididas las diferentes cargas, hay que plantearse la forma de combinarlas para aproximarnos a la realidad. Un viento muy fuerte reduce el tráfico que circula sobre un puente. No es lógico considerar simultáneamente el máximo viento y la máxima carga. Y siendo tantas las acciones a considerar, son muchas más sus posibles combinaciones. No es la menor de las decisiones que hay que tomar al proyectar un puente.

Supuestas decididas las acciones y sus combinaciones, para lo que necesitamos la ayuda imprescindible y adormecedora de los códigos reglamentarios, debemos modelizar la estructura teniendo en cuenta su geometría y los materiales que la constituyen. Si, como referencia, representamos los resultados de la rotura de probetas de hormigón de dimensiones normalizadas fabricadas en unas instalaciones con las mejores condiciones de homogeneidad y calidad posibles, nos

encontraremos con una distribución de resultados a partir de los cuales tenemos que caracterizar el hormigón que utilizaremos en los cálculos estructurales, sin perder de vista que un material tan complejo como el hormigón, no puede quedar representado exclusivamente por su *resistencia*, por característica que pueda ser.⁶

Está universalmente aceptado que un hormigón se caracteriza por la *resistencia característica*, medida a partir de un conjunto de probetas normalizadas cuya rotura se produce a los 28 días.

En la figura, tomada de una excelente publicación de René Walther y Manfred Miehlebradt, editada por la Escuela Politécnica Federal de Lausanne, se muestran las resistencias relativas que resultan en función de la geometría de la probeta ensayada, y de la superficie de aplicación de la carga. (fig. 5-6b)



Hemos tratado en aforismos anteriores de tensiones internas autoequilibradas y de la variabilidad de las reacciones de apoyo y de la respuesta estructural. Representemos ahora, -para cerrar este levísimo recorrido por las incertidumbres- los resultados de ensayos de una estructura muy simple: el soporte comprimido biarticulado de esbeltez variable, y observemos la nube de puntos que genera la dispersión de resultados reales. (fig. 5-7)

Estamos muy lejos, por tanto, de la imagen determinista y dominadora que de la Ingeniería y del ingeniero tiene la Sociedad, en buena medida supongo 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*. Y es que 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 durante un incierto período, el de su *vida útil*.

Es cierto que con relativa frecuencia se producen accidentes de los que algunos, relativamente pocos, afloran en los medios de comunicación. Otros, algunos más, se recogen en las revistas especializadas, y la mayoría solamente tienen consecuencias económicas y no trascienden más allá del ámbito en el que se han producido y en el que influyen económicamente. Los primeros, los que se llegan a conocer por el

público en general, pueden hacer *sospechar de la amplitud de nuestra ignorancia*. Sería un error basarnos en ellos para hacerlo. Con relativa frecuencia, los accidentes estructurales no son consecuencia de nuestra ignorancia sino de no haber puesto en práctica los conocimientos que tenemos o deberíamos tener, porque son accesibles para todos. Y, en no pocas ocasiones, los errores que originan accidentes son consecuencia de unas condiciones de trabajo que no propician el uso y actualización de nuestros conocimientos, ni contemplan procedimientos que al incrementar la probabilidad de detectar equivocaciones en la concepción, dimensionamiento o construcción de una estructura, reduciría la frecuencia o importancia de los accidentes.

Es cierto que los accidentes enseñan y que sus enseñanzas pueden ser fecundas, pero no siempre contribuyen a ampliar nuestros conocimientos. En todo caso, a ser más conscientes de ellos. Aunque, sobre todo, suelen ser reveladores de deficiencias en los procedimientos utilizados para incorporarlos en los proyectos y en las obras. Ya se sabe, también, que conviene aprender de los errores ajenos porque no vivimos suficiente tiempo para aprender suficiente con los nuestros.

Por otra parte, suele ser más eficaz, menos costoso y mucho menos doloroso, aprender de la observación de las estructuras sanas cuyas imperfecciones (que no justificarían el adjetivo de enfermas) son compatibles con su funcionalidad y seguridad, y se manifiestan a los ojos del observador atento y competente (no competitivo). Hay otras formas muy eficaces de progreso en el conocimiento y, desde luego, lo es la investigación que permite y exige enfocar con intensidad la atención a aspectos específicos, que forman parte de un problema más general que aquél ayudará mejor a comprender y resolver si no se pierde de vista qué es lo que se pretende y cómo se integran los nuevos datos y los nuevos conocimientos en el marco global del que forman parte.

Y hay otro aspecto también esencial en el proceso global de gestión de las incertidumbres que es la transmisión de conocimientos e ignorancias conocidas a través de las fronteras temblorosas de la duda, compañera inseparable de nuestros conocimientos.

Y así 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 nos resulta, creo yo, claramente aplicable a lo que sucede al ser humano. Son inciertas las cargas que soportamos. Algunas las sentimos aunque nos están ocultas a la vista. Todas varían con el tiempo, con la posición geográfica, con el ambiente que nos rodea. Conocemos limitadamente los tejidos con los que estamos constituidos, y muchos menos los espacios inmateriales que llenan el vacío entre aquéllos y que quizás sea lo que llamamos espíritu. Podemos razonablemente acotar la respuesta a las cargas que físicamente nos solicitan y son mucho más inciertas las respuestas a las acciones que nos conmueven. El ser humano también es un gestor de incertidumbres. Y como en las estructuras, para que la gestión sea eficaz, debemos establecer una metodología que tenga en cuenta la naturaleza y el rango de variación de las incertidumbres y nos sirva para conocerlas mejor. En las estructuras, los métodos actuales consisten en crear “bolsas de incertidumbres” como son las que encierran a las que cohabitan con las acciones, las que son inherentes a los materiales, las que engloban la incierta modelización de la estructura y las que acotan la imprecisión de los modelos resistentes. A unas aplicamos un coeficiente de mayoración confiando en que la probabilidad de que las cargas de cálculo sean superadas por las reales, se quede en un porcentaje socialmente asumible. A la “bolsa de los materiales” aplicamos un coeficiente de minoración con la intención de reducir a límites también asumibles, la probabilidad de que en la realidad sus parámetros sean inferiores a los especificados. También aplicamos coeficientes reductores al valor de los esfuerzos resistentes que resultan a partir del modelo de cálculo establecido. Y, además, distinguimos situaciones en las que debemos comprobar la seguridad frente al colapso estructural, de aquellas cotidianas, en las que la preocupación determinante es la funcionalidad, la utilidad de la estructura que proyectamos para ser construida.

Se trata de evitar que la estructura flecte demasiado, para que no se nos fisuren los tabiques que apoyan en ella, ni se desportillen los azulejos del cuarto de baño o tengamos dificultades para abrir o cerrar ventanas y puertas descuadradas. Necesitamos que las vibraciones sean imperceptibles (las estructuras están vivas, siempre se están moviendo)

o al menos tolerables. Que sus fisuras no sean el camino para degradaciones tempranas. Pero para hacerlo tenemos que reconocer las incertidumbres de nuestros conocimientos, estableciendo unos límites de flechas, pongamos de un milésimo de la longitud de la viga, o de tres décimas de milímetro para la anchura de las fisuras. Son planteamientos muy groseros cuantitativamente, aunque valiosos cualitativamente porque nos alertan de los objetivos que perseguimos y propician los métodos para alcanzarlos.

No nos planteamos tan palmariamente la seguridad en los seres humanos, lo que sería como querer saber el tiempo que nos queda por vivir, ni sistemáticamente evaluamos nuestra “funcionalidad” que se relaciona con nuestra *calidad de vida*. Pero hay datos bien a la vista que apuntan en esas direcciones. El escrutinio periódico de nuestra salud tiene esa finalidad. En el cada vez más familiar mundo de los seguros o de los planes de pensiones, se cuantifica, fríamente, no hay más remedio, la probabilidad del tiempo de vida de quien se *asegura* y en la que el candidato a pensionista o asegurado implícitamente considera que va a vivir más tiempo que el que las estadísticas le han asignado tras controlar su salud, edad y circunstancias. Por el contrario, la Institución con la que contrata minora -sobre el papel, claro- la esperanza de vida de su cliente, para que de la mayoración de unos y de la minoración de otros, resulte un balance estadísticamente positivo.

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, en cambio, que sea dócil y maleable. Quizás, por cierto, conviniese reconsiderar las definiciones de estas dos últimas palabras que, pareciendo sinónimas de las anteriores, tienen, creo yo, significados profundamente diferentes.

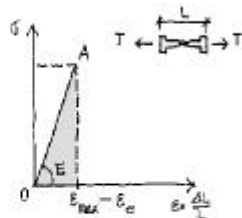
La necesidad de resistir a las acciones a las que estamos sometidos, es la mejor comprendida. Nadie la pone en duda y parece que hubiésemos nacido con el teorema de Newton genéticamente instalado.

La ductilidad es un concepto enjundioso que demanda mayor atención. Es una palabra frecuentemente utilizada que goza de muy buena opinión pública, aunque no siempre se comprende su significado profundo. Porque, también, es generalmente apreciada la elasticidad. En particular, en el mundo del deporte, entre las cualidades de los atletas se valora su elasticidad, que se tiene por uno de los atributos destacados de la belleza, a la que curiosamente llamamos plástica. Sin embargo, son conceptos diferenciados. No se puede decir que la ductilidad sea lo opuesto a la elasticidad, pero sí, en todo caso, que aquélla surge cuando ésta se agota. Lo contrario de la ductilidad es la fragilidad, enemigo primordial de las estructuras y de los seres humanos.

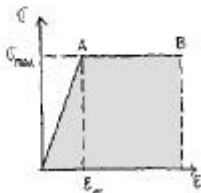
La imagen característica de ambos conceptos se muestra en los gráficos tensiones-deformaciones del vidrio, material esencialmente elástico y frágil, y del dúctil acero. El trabajo necesario para romper una probeta en tracción de uno u otro material, está representado por las áreas sombreadas en la imagen, lo que es un índice muy expresivo de su diferente comportamiento. (fig. 6-1)

LA IMAGEN DE LA ELASTICIDAD Y DE LA DUCTILIDAD
BRITTLENESS AND DUCTILITY

EL VÍDRIO ELÁSTICO
BRITTLE GLASS



EL DÚCTIL ACERO
DUCTILE STEEL



En el esquema simplificado que representa el diagrama tensiones-deformaciones del vidrio ensayado a tracción, la línea recta OA expresa el recorrido del material ensayado. Llegado a la cima del camino, la probeta rompe bruscamente con una pequeña deformación ϵ_y , correspondiente a su tensión máxima. La pendiente de la recta será el módulo de elasticidad, E, y el área sombreada bajo la recta está relacionada con la energía necesaria para romper la probeta ensayada. Es un material estructuralmente inaceptable.

En cambio una probeta de acero, como se ve en el esquema simplificado, tendrá un comportamiento elasto-plástico mucho más conveniente. Alcanzado el punto A que representa el límite de su comportamiento elástico, la probeta continuará su deformación sin incrementar por ello su tensión hasta alcanzar el punto B de rotura para una deformación ϵ_u . El área sombreada bajo la línea quebrada OAB, será proporcional a la energía necesaria para alcanzar el colapso.

Es obvio, desde el punto de vista energético, que el comportamiento del acero es mucho mejor. Pero desde otra perspectiva, la tensional, no cabe duda que los materiales frágiles como el vidrio exigen un preciso conocimiento de su situación tensional para poder sacarle partido estructural, superando la inseguridad de saber si estamos lejos del precipicio que se esconde tras su cima. Y ya se ha visto la imposibilidad de conocer el estado tensional, imprescindible sin embargo en este caso.

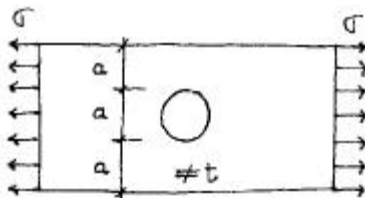
En cambio, en el acero es mucho menos trascendente el estado tensional previo a la carga. Aunque sobrepasásemos el punto A, la probeta no rompería. No aceptaría más carga pero se deformaría ostensiblemente avisándonos de la proximidad de la rotura antes de que llegue a producirse.

La ductilidad, en el material, es la capacidad para deformarse más allá del valor que, convencionalmente, llamamos elástico y, por tanto, es una cualidad que se puede expresar por la relación:

$$\mu = \frac{\epsilon_u}{\epsilon_e} - 1$$

Rememoremos ahora, para subrayar estas ideas, el comportamiento de una típica probeta perforada en el centro y solicitada en tracción. Supondremos, en primer lugar, que se ha eliminado todo defecto superficial.

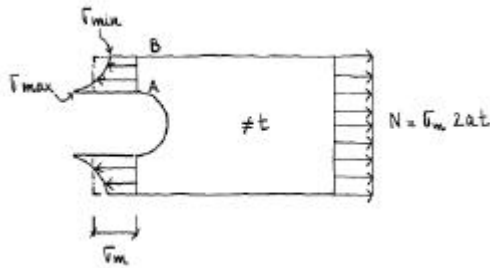
ENSAYO DE UNA PROBETA DE ACERO
TENSILE TEST IN A STEEL SPECIMEN



Retornando a la probeta en la que estamos apoyando esta reflexión, sabemos que al comienzo del ensayo la distribución de tensiones en la sección más desfavorable, que coincide con el eje de la perforación, no será uniforme. (fig. 6-3)

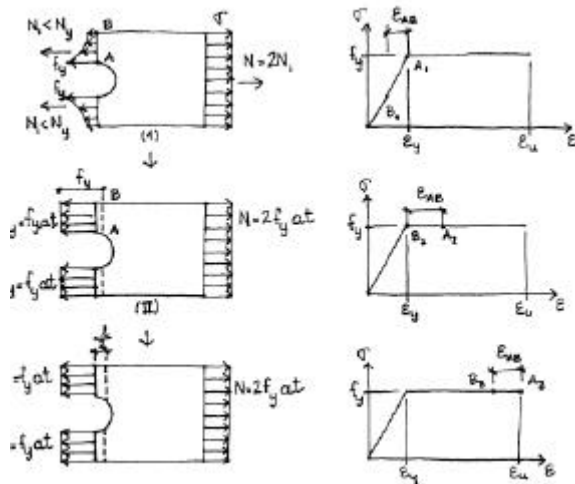
El valor máximo de la tensión, será: $\sigma_{\max} = \frac{N}{2a} \cdot k$

siendo k un factor de concentración de tensiones que, en general, suele estar comprimido entre 2 y 3.



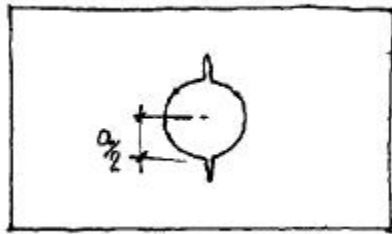
Una probeta de un material sin ductilidad como el vidrio, rompería cuando el valor de σ_{\max} alcanzase su límite elástico, y lo haría bruscamente con una escasísima deformación.

Una probeta de acero dúctil tendrá un comportamiento similar hasta que en el borde se alcance la tensión y deformación correspondiente al límite elástico. Pero gracias a su ductilidad, la probeta continuará deformándose hasta que la totalidad de las tensiones llegasen al límite elástico. Después continuaría la deformación, manteniéndose constante la tracción exterior aplicada, hasta alcanzar la deformación de rotura. (fig. 6-4)



Gracias a la ductilidad del acero se habrá podido alcanzar la misma tensión en todas las fibras y la probeta habrá resistido una tracción ($N=2 f_y \cdot a$) muy superior a la que habría producido la rotura de la probeta del mismo material frágil, sin posibilidad de plastificarse.

Por tanto, la carga de rotura no está influida en este caso 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 la carga y por eso se puede decir que “*la ductilidad es un puente sobre nuestra ignorancia*”. Pero esto no significa en las estructuras, como en los seres humanos, 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 la 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 a las probetas perfectamente pulidas y sin defectos, se le produce una fisura transversal en el eje del agujero, con una profundidad muy reducida, y un radio pequeñísimo en el fondo de la fisura. (fig. 6-5)

A la punta de tensiones que ya existen junto al agujero central, se sumarían las que provocaría la fisura, que serían muy elevadas al ser el radio r muy pequeño. La probeta de vidrio rompería bruscamente para una carga muy pequeña.

En la probeta de acero dúctil y tenaz se podían producir plastificaciones localizadas, esto es, una bolsa de plastificaciones en el entorno del fondo de la fisura en cuanto los puntos de tensiones alcanzasen el límite elástico, y que se iría incrementando a medida que fuese aumentando la carga, hasta producir la plastificación completa de la sección y su rotura dúctil.

Pero existiría también la posibilidad de que las deformaciones en la raíz de la fisura que hemos creado, superasen valores límites y que el fondo de la fisura se rasgase y el rasgado se transmitiese progresiva y rápidamente al resto de la sección. La probeta rompería así con pequeños alargamientos y cargas muy reducidas. Ello significaría que la energía disponible en el plano prolongación de la fisura inicial no es suficiente para equilibrar la energía interna, que se va acumulando en el volumen del material a medida que se incrementa las tensiones y deformaciones en la probeta.

La energía superficial que es una medida de la capacidad del material para evitar la decohesión brusca y progresiva del material es un atributo del material, una de sus características esenciales a la que denominamos tenacidad, el corazón de la mecánica de fractura.

La resistencia y ductilidad son definiciones de características, de sencilla medición, que no son sino una expresión a escala

macroscópica del comportamiento del material a escala microscópica. Sólo a escala atómica se pueden comprender los mecanismos de rotura y, a partir de dicha comprensión identificar parámetros como su tenacidad o sus manifestaciones microscópicas, que son lo que llamamos ductilidad o resistencia.

Pensando en términos de deformabilidad límite del material, se comprende que la tenacidad de un material depende del espesor de la pieza que se utilice. La deformabilidad longitudinal de la probeta conlleva una deformabilidad transversal que de estar coaccionada la limita. Cuando mayor es el espesor de una pieza mayor será la coacción a las deformaciones longitudinales.

Por otra parte, los ciclos alternados de tensiones que conducen a la rotura por fatiga, van consumiendo deformabilidad según la importancia de las variaciones tensionales y la frecuencia con que se repiten. O de otra manera, se podría decir que *“la deformabilidad disponible va disminuyendo con el tiempo”*, lo que equivaldría a una reducción virtual de la tenacidad y un desgarró prematuro en relación con la que se produciría para cargas estáticas.

Conviene dejar también anotado que existe una peculiaridad estructural que, a pesar de su importancia, no es suficientemente conocida y recordada: cuando la estructura tiene que recurrir a su ductilidad, lo hace a costa de disminuir su capacidad resistente. Como en el ser humano. Con el paso del tiempo vamos consumiendo nuestro capital de ductilidad y, progresivamente, se va reduciendo nuestra capacidad de resistencia.

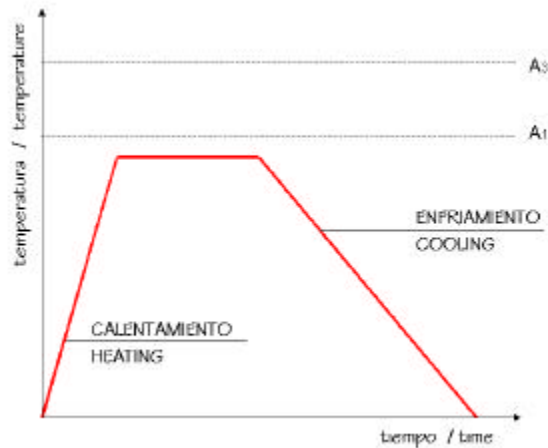
Pero volviendo al origen de esta reflexión, resulta evidente que el comportamiento dúctil y no frágil de una estructura depende de la tenacidad del material con el que está construida. La tenacidad impide que una pequeña entalla, fisura o defecto superficial o volumétrico, actuando como concentrador de tensiones, provoque la rotura brusca y asintomática de la probeta o estructura. Cuanto mayor sea la tenacidad del material, a igualdad de otras condiciones, mayor será la profundidad de la entalla o fisura necesaria para provocar la rotura progresiva y brusca. Por ello, podemos decir que la tenacidad, característica esencial del material, expresa su *“tolerancia al daño”* y manifiesta la amplitud del daño que puede tolerar sin transformarse en frágil y romper fruscamente.

Y esta cualidad del material es particularmente deseable porque inevitablemente los materiales tienen defectos en superficies que generan puntas de tensiones (incuantificables debido a acciones externas o internas que no siempre somos capaces de percibir), que son la chispa que enciende el mecanismo de formación de una fisura que, a su vez, magnificará los puntos de tensiones en un proceso progresivo que conduciría rapidísimamente a la rotura si la tenacidad del material no frenase su progreso o, de otra manera, que la magnitud de la fisura fuese claramente detectable durante las inspecciones periódicas y permitiesen remediarla.

Comprendidos los mecanismos de rotura, dúctiles o frágiles, de los materiales, la industria puede mejorarlos y los ingenieros podremos demandar materiales con la resistencia, la ductilidad y la tenacidad adecuada, con menores defectos superficiales y con menos posibilidades de provocarlos en las fases de ejecución y de servicio de las estructuras construidas con ellos.

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 aíse 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.

Y lo digo para traer a colación que, como es bien sabido, 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. 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. (fig. 6-6)

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 obtienen 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.

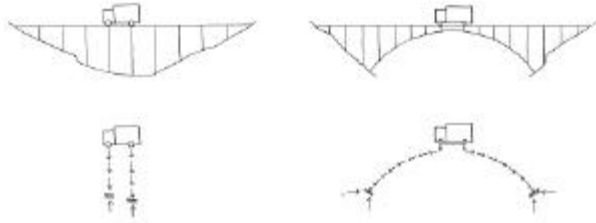
En el ser humano, la sauna sería el equivalente al proceso de recocido y, efectivamente, sirve para aliviar tensiones. El uso sistemático de la ducha fría al levantarse equivale al templado, y conviene tomar alguna precaución para evitar que una mejora en el temple lo sea a costa de otras cualidades.

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 y utilización de una estructura, la consciencia de lo que en cada momento estamos haciendo y la incorporación de nuestros conocimientos en cada una de las innumerables decisiones que tomamos, es el factor determinante para lograr estructuras sanas y seguras. Porque son los conocimientos los mejores gestores de las incertidumbres y el antídoto contra las consecuencias de la ignorancia.

En etapas previas del proceso de gestación, los conocimientos son reclamados en la elección de los materiales y en la concepción de la estructura. En la siguiente etapa, las de dimensionamiento y verificación de la estructura concebida, son igualmente necesarios. Pero se han ido instalando en todos los ámbitos de la práctica profesional, bajo la presión del tiempo y de la comodidad intelectual, hábitos desalentadores. No me estoy refiriendo a la dictadura de los ordenadores que están ahí para servirnos. Me refiero a una enfermedad a la que podríamos llamar “calculitis”, cuyo síntoma esencial es confundir el proyecto de una estructura con su cálculo y entronizar el cálculo como la finalidad del trabajo ingenieril y no como un instrumento al servicio del proyecto. Una enfermedad verdaderamente terrible, de carácter epidémico y universal a lo que parece, y para la que hay que encontrar antídoto, porque en otro caso, y cuando menos, abortará el progreso en la ingeniería estructural. No se trata de calcular más o hacerlo más deprisa. Se trata de comprender mejor, de dominar los instrumentos que tenemos para que hagan el trabajo rutinario y podamos concentrarnos en lo



esencial: la comprensión, la utilización de conocimientos, la consciencia permanente de lo que estamos haciendo. Hay en la actualidad una inflación de cálculos mecánicos y me temo que se puede decir con algún fundamento que *“cuanto más se calcula menos se piensa”*.

Entre los componentes de un antídoto contra la “calculitis”, se encuentran los tres que enuncia el aforismo que encabeza esta reflexión:

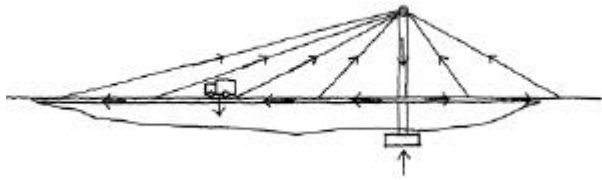
- Dibujar la estructura antes de calcularla
- Comprender el significado físico de las fórmulas empleadas
- Hacer un cálculo manual aproximado de la estructura

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 sobrecargas suficientes y los cruces de caminos permiten ordenar el tráfico tensional sin conflictos insuperables.

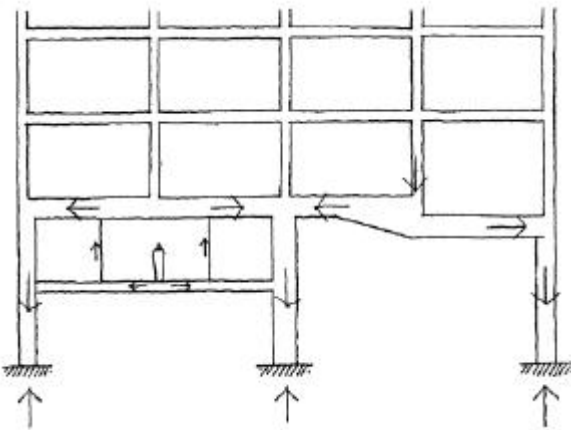
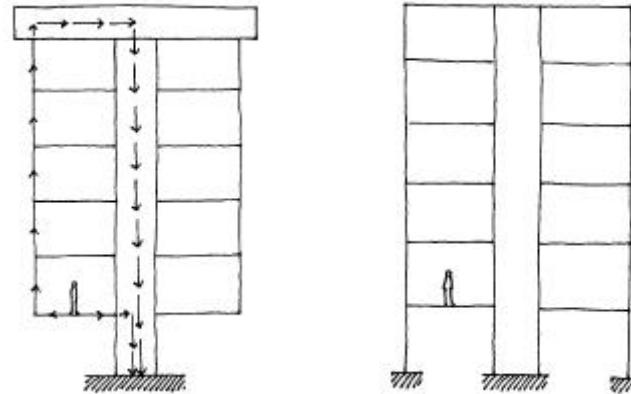
El dibujo de la estructura, que permite verla en su globalidad, ofrece una gran cantidad de información muy valiosa sobre la bondad de la concepción, los criterios implícitos que la justifican y advierte de los puntos más críticos sobre los que se debe prestar especial atención. Ilustremos lo dicho con algunos sencillos ejemplos, en los que se muestra el recorrido de una carga. (fig. 7-1 + 7-2)

Es evidente que el recorrido que tiene que hacer la carga a hombros del trabajo de flexocompresión de los diferentes elementos estructurales, es mucho más largo y quebrado en el puente arco que el que exigiría la solución alternativa. Por ello, la elección de la solución arco tiene que estar basada en razones muy sólidas como pueden ser: pobres características del terreno de cimentación bajo el arco, profundidad de la cerrada, costes de cimientos y pilas del ciempiés alternativo, aspectos estéticos, paisajísticos, y otros.

Hace algunas decenas de años, en época de prosperidad económica, brotó internacionalmente un interés por los edificios con estructura colgada. En el Paseo de la Castellana de Madrid se construyeron dos,



por ejemplo. En ellos el recorrido del peso de una persona hasta llegar a descansar en el cimiento es el del esquema siguiente. Una parte de su peso tiene que subir hasta la cubierta por el tirante exterior, que actuará de ascensor estructural, para después descender por él hasta alcanzar su sólido cimiento. 7-3 La solución tradicional hubiese sido (fig. 7-4)



En la actualidad se construyen pocos edificios colgados. La moda pasó y el coste de los alardes se destinó a otras finalidades y, entre ellas, a la publicidad directa del edificio y de sus promotores. Pero quizás en los últimos tiempos está ocurriendo algo similar con los puentes atirantados, concepto y tecnología que han hecho posible la construcción eficiente de hermosas obras en parajes complejos que no se podían, por una u otra causa, utilizar como cimiento generalizado. Por ello, las soluciones atirantadas, las cargas del tablero y de los vehículos que circulen por él, deben escalar por los tirantes para llegar a la coronación de un elevadísimo mástil y precipitarse vertiginosamente (al tiempo que las cargas provenientes de los otros tirantes que han sido también atraídos por esa especie de pararrayos estirado que vigila la obra), hasta el enorme cimiento en el que se reúnen la mayor parte de sus cargas. Más de una vez, sin embargo, esta espléndida solución se ha utilizado indebidamente, forzando las luces sobre un terreno próximo del tablero, apto como cimiento, y logrando una obra cuyo sobrecoste solamente puede estar compensado por las ventajas de una imagen atractiva o sorprendente en una época, es cierto, en la que lo visual está altamente valorado. 75



Existe otro ejemplo relativamente habitual, de los que podríamos llamar “estructuras ortopédicas”, en las que uno o varios pilares tienen que ser interrumpidos y hay que hacerlos descansar en grandes dinteles, para crear un espacio sin columnas. La tortuosidad aparente del camino que se ven obligadas a seguir las cargas, reclama un estudio de otras alternativas menos ortopédicas y, si no fuesen posibles, la imagen nos ayudaría a enfocar la atención sobre los puntos críticos de la estructura y los problemas que pueden derivarse de la deformabilidad de los grandes pórticos en el comportamiento de las plantas superiores. (fig. 7-6)



Llegados a este punto, tratemos de las formulaciones estructurales y de la importancia de comprender su significado físico, para extraer de ellas todo el conocimiento que atesoran y controlar sus aplicaciones.

Con tal finalidad, 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.

La tercera ley de Kepler:

$$P^2 = a^3$$

La ley de la gravitación universal, que entre tantísimas cosas, explica el significado físico de la anterior, la formuló Newton en los imperecederos términos:

$$F = G \cdot \left(\frac{m_1 m_2}{r^2} \right)$$

El segundo teorema, también de Newton: $F = m a$



La teoría de la relatividad, que Einstein sintetizó en una expresión de utilidad y belleza muy poco relativa:

$$E = mc^2$$

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. (fig. 7-10)

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 que empeñar en proyectar su estructura para que los nudos que resulten sean algunos de los que disponen de fórmulas para su evaluación.

No es una crítica fácil e injusta dirigida a quienes han tenido el mérito de investigar el problema y la generosidad de ofrecer sus resultados. Se ha traído aquí a colación porque es expresión de los riesgos que nos acechan y que, en alguna ocasión, cada cual ha contribuido a alimentar. Todos los trabajos que realizamos deben estar orientados a adquirir nuevos conocimientos, mejorar los existentes y a favorecer su difusión. Y la difusión de conocimientos será muchísimo más eficaz si la formulación que la sintetiza expresa su significado físico, facilitando su comprensión. Al hacerlo promoverá su acertada y amplia utilización que, a su vez, alimentará la necesidad de nuevas investigaciones.

Imaginemos, por otra parte, que al imprimir la ley de la relatividad, apareciese:

$$E = m^2 c$$

Inmediatamente, nos daríamos cuenta de que se trata de un error. Imaginemos ahora que en la fórmula de la capacidad del nudo se hubiese deslizado también un error de imprenta. Sería imposible de detectar y, de hecho, siempre debemos tener la preocupación de si efectivamente puede haberse producido.

También es un índice del confuso ambiente profesional con el que nos encontramos, el hecho de que este tipo de formulaciones se basa en trabajos promovidos por las industrias metalúrgicas, para alentar la utilización del acero, quizás porque se supone que si se evita al usuario la necesidad de pensar, estará más inclinado a demandar el producto. Esperemos que no sea así.

También una admirable Institución, a quien tantos debemos tributo por la labor que realiza, ha incluido en una de sus prestigiosas publicaciones un texto en el que figura una extraordinaria formulación, con la que se pretende estimar las propiedades visuales de un paisaje.

$$\begin{aligned}
Y = & 68.30 - (1.878 \text{ HEALTH}) - (0.131 \text{ X1}) - (0.064 \text{ X6}) + (0.020 \text{ X9}) + (0.036 \text{ X10}) + (0.129 \\
& \text{X15}) - (0.129 \text{ X19}) - (0.006 \text{ X32}) + (0.00003 \text{ X34}) + (0.032 \text{ X52}) + (0.0008 \text{ X1 X1}) + \\
& (0.00006 \text{ X6 X6}) - (0.0003 \text{ X15 X15}) + (0.0002 \text{ X19 X19}) - (0.0009 \text{ X2 X14}) - \\
& (0.00003 \text{ X52 X52}) - (0.0000001) \text{ X52 X34}
\end{aligned}$$

La tabla 1 define las 32 variables independientes que intervienen en la ecuación, y la tabla 2 proporciona los 20 factores de calidad que han de ser considerados.

TABLE 2 *Environmental Quality Index*

B	Purifies Water	+ I 0 - I	L	Provides Shade	+ I 0 - I
C	Builds Soil Resources	+ I 0 - I	M	Presents Pleasant Smells	+ I 0 - I
D	Promotes Human Cultural Diversity	+ I 0 - I	N	Presents Pleasant Sounds	+ I 0 - I
E	Preserves Natural Resources	+ I 0 - I	O	Does not Contribute to Global Warming	+ I 0 - I
F	Limits Use of Fossil Fuel	+ I 0 - I	P	Contributes to the World Economy	+ I 0 - I
G	Minimizes Radioactive Contamination	+ I 0 - I	Q	Accommodates Recycling	+ I 0 - I
H	Promotes Biological Diversity	+ I 0 - I	R	Accommodates Multiple Use	+ I 0 - I
I	Provides Food	+ I 0 - I	S	Accommodates Low Maintenance	+ I 0 - I
J	Ameliorates Wind	+ I 0 - I	T	Visually Pleasing	+ I 0 - I
Total Score					

Se trata de una formulación verdaderamente extraordinaria, como lo es el texto que la acompaña, en la que se puede leer: “*The equation can be explained with a general theory: the biospheric preference theory*”.

Es frecuente encontrarnos con notas de cálculo realizadas con ordenador, de tal magnitud que no es posible o, en todo caso, muy desestimulante, el análisis de los resultados y obtener una idea clara del comportamiento de la estructura. Se produce una indigestión de números. Suele haber mucho cálculo y poco análisis. Y cabe preguntarse parafraseando una expresión célebre si “los cálculos no sirven para ocultar el pensamiento”. Porque la calidad de una nota de cálculo no depende de su extensión, sino de su claridad. Debe ser el testimonio del dimensionado estructural y debe facilitar los controles que permitan localizar errores o carencias antes de la construcción. Quizás uno de los remedios que se podrían intentar para frenar esta tendencia, es que los honorarios profesionales por los cálculos realizados, sean inversamente proporcionales al número de páginas necesarias para evaluar con claridad y eficacia la totalidad de la estructura.

Por otra parte, la inmensa mayoría de los programas no permiten el análisis de las zonas singulares que suelen ser, sin embargo, en donde se origina la mayor parte de los problemas. En fin, no se trata aquí, ni mucho menos, de renunciar a un instrumento indispensable como son los cálculos mecanizados, sino de recordar en voz alta que debe ser un instrumento utilizado 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 estructura, y que preparen síntesis claras de los resultados y que los contrasten con los que previamente se habían estimado con modelos simples pero muy 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 entre conocimiento y sabiduría. Estamos refiriéndonos a la necesidad de filtrar las oleadas de información indiscriminada que nos llega, para digerir lo esencial y poder utilizarla y transmitirla.

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 botellas” 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 estamos asentados.

Y el ser humano no debe tampoco utilizar fórmulas cuyo significado no comprende. Y ser consciente que, precisamente, la parafernalia informativa que nos bombardea con sus remedios a unas necesidades que primero algunos se han preocupado en inventar, pretenden precisamente anular nuestra capacidad de pensar, sortear las posibilidades de escrutinio que nos brindan nuestras sensibilidades y conocimientos, y lograr que aceptemos como buenas las que resultan de fórmulas que no comprendemos y de las que, a veces, se dice que no estamos preparados para comprender. Los predicadores, los que gritan para que otros callen, los de la matraca, los que contribuyen a la polución informativa (la más peligrosa de las formas de polución, porque es la que más directamente afecta al cerebro), todos nos proponen fórmulas interesadas que debemos comprender para

desmontar unas y discernir otras que sí nos enriquecen, y que podemos identificar utilizando el cedazo de nuestra consciencia y de nuestros 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 cometidos.

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 inesperadas e inaceptables, los excesos de flechas, los envejecimientos prematuros, los colapsos parciales o generales, lentos o bruscos, suelen ser con frecuencia, consecuencia de falta de atención, conocimientos insuficientes, escasez de tiempo, problemas en la comunicación, organizaciones inadecuadas, precios desestimulantes, cambios precipitados, rebajas en precios y en calidad, falta de profesionalidad y condicionantes que han pasado desapercibidos. Ortega ya observó al respecto que *“la realidad ignorada prepara siempre su venganza”*.

También debemos considerar como una forma de patología que es manifestación de mal trato, su aspecto exterior, su imagen visual. No se trata de crear una obra de arte cada vez que construimos una estructura, pero podemos estar seguros que cuando todo el proceso de concepción, proyecto y construcción está en manos de profesionales competentes y sensibles, integrados en organizaciones eficientes, con tiempo, medios y recursos para realizar su labor, 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. Concepciones traumáticas, cambios geométricos bruscos, pilares que nacen con la tara de un origen inapropiado, proliferación de juntas por las que sangra la estructura, suciedades y desorden en la obra, insuficientes o poco percibibles medidas de seguridad, falta de equidad en los flujos económicos entre participantes, peleas contractuales, retrasos acumulados, subcontrataciones generalizadas y mal encuadradas, clientes incompetentes y dictatoriales,... El análisis visual de la

estructura, primero en los planos, luego durante la construcción a medida que va creciendo y finalmente cuando ya está concluida, nos ofrece mucha e indispensable información sobre los problemas posibles que hay que tratar de evitar, para asegurar el bienestar estructural.

Mostramos, como ejemplo, unas dolorosas imágenes de estructura maltratada. (fig. 8-1)

Pongamos como contraste la imagen feliz de estructuras bien tratadas: la noria del Prater vienés; la cubierta del Hipódromo de la Zarzuela. (fig. 8-2 + 8-3)

Cuántos accidentes se podrían evitar si hiciésemos caso de los mensajes que nos envía la estructura, a la que irrita por encima de todo la desidia que supone el no utilizar los conocimientos que tenemos a nuestra disposición. Por citar solamente algunos de allende nuestras fronteras, sabemos que la tragedia del puente de Seoul era razonablemente previsible, que los desastres que produjo el terremoto de Kobe no debían haber tenido tanta trascendencia, al igual que lo ocurrido con el colapso y los daños de los puentes en California en el último terremoto. Y que la destrucción del puente de Melbourne y otros ocurridos en la década de los 70, no fueron consecuencia de conocimientos insuficientes, aunque siempre lo son. El desastre del puente colgante de Tacoma tampoco debía haber ocurrido. Había conocimientos suficientes, aunque no suficientemente generalizados para preverlo. De hecho, tiempo atrás, un puente de una tipología similar, colapsó por una causa similar. Y no se aprovecharon estos conocimientos. Porque si las catástrofes estructurales no son, ni mucho menos, un medio adecuado para mejorar conocimientos, no cabe duda que la notoriedad de los desastres suele ser ocasión para profundizar en sus causas y difundirlas en la comunidad profesional como antídoto para que sea menos probable que se repitan.

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.

LA ESTRUCTURA MALTRATADA



LA ESTRUCTURA FELIZ





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 que de ser percibidas facilitarían la identificación de sus causas. Por eso, como en las estructuras, la observación del ser humano es un caudal valiosísimo de información. Y desde que se inventó el espejo, esta información está también, y sobre todo, a la vista del propio ser.

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 ponen remedio a las causas, acabaremos inevitablemente desenmascarándonos.

COLOFÓN



Concluye aquí la síntesis de los pensamientos que he querido compartir, lector amigo. Y ahora, en el crepúsculo del texto, en la alborada de mi despedida, permíteme invitar 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 que mis reflexiones quieren ser un homenaje hacia tantos compañeros, que en todo el mundo, profesan en la ingeniería estructural. Me siento orgulloso de ser miembro de una profesión tan útil, tan emocionante y con tantas posibilidades creativas. Todos, al pasear conmigo por mi texto, habréis confirmado la amplitud de vuestros saberes. Tal vez, aquí o allá, habrá surgido una idea o una imagen que refleje otra perspectiva de vuestro saber. Y, acaso, en un lugar o en otro, habréis desvelado imperfecciones que sabréis generosamente disculpar. También puede ser que la lectura haya gestado en vosotros nuevas ideas o nuevas formas de expresarlas. Es mi mayor aspiración.

A nadie he querido molestar. El auténtico humor consiste en reírse de uno mismo. Yo procuro practicar tan sano ejercicio y confío en que se note.



Un compañero y amigo, César Lanza, maratoniano experto en ingenierías y latines, me recordaba que para el poeta inglés Auden, el aforismo es esencialmente un género aristocrático de escritura. El aforista no discute ni explica, afirma, e implícita en esta afirmación existe la convicción de que es más sabio o más inteligente que sus lectores. Espero que esto no sea aplicable a los que yo he escrito. En ellos propugno, aforísticamente, la imperiosa necesidad de comprender para no tener precisamente que comulgar con ruedas de molino. Es verdad, por tanto, que he escogido una fórmula contradictoria para comunicarme. Y no está mal que el punto final se anuncie con esta poco dudosa verdad.

JAVIER RUI-WAMBA MARTIJA

Javier RUI-WAMBA



Nacido en Guernica en septiembre de 1942. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos a los 23 años. Trabajó en Cubiertas y MZOV en el proyecto y construcción de los puentes del Plan Sur de Valencia. En 1969, durante un año, fue ingeniero en la oficina de Freyssinet en París. A su vuelta, en enero de 1970, fundó la Sociedad de Ingeniería Esteyco, en la que desde entonces ha desarrollado sus actividades profesionales, dirigiendo a un equipo pluridisciplinar, en la actualidad con 40 personas en Madrid y Barcelona, que ha realizado más de 500 proyectos y direcciones de obras de todo tipo de estructuras, obras civiles y arquitectura. Ha sido durante 17 años profesor de Estructuras en la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, hasta 1991. En marzo de 1996 fue elegido miembro de la Academia de Ingeniería. Ha sido presidente de la Asociación Española de Ingenieros Consultores (Asociación Nacional miembro de Fidic, Efca y Fepac). Miembro de honor de la ATEP. Medalla de la ATEP por la contribución al desarrollo del hormigón pretensado en España. Premio Construmat 1993. Medalla al mérito profesional del Colegio Nacional de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, y conferenciante invitado en Argentina, Francia, Uruguay y España. Preside la Fundación ESTEYCO.

Jörg SCHLAICH



Nació en 1934 en Stetten i. R. cerca de Stuttgart. Estudió arquitectura e ingeniería civil, Dipl.-Ing. por la Universidad Técnica de Berlín, Master of Science por la Case Tech de Cleveland y Doctor Ingeniero por la de Stuttgart.

Profesor y Director del Institute für Konstruktion und Entwurf II (Instituto de Diseño Estructural) de la Universidad de Stuttgart. Enseñanza e investigación en estructuras de hormigón armado y pretensado, así como en estructuras ligeras (cables y membranas).

Ingeniero Consultor y Consultor homologado en la República Checa, Schlaich Bergermann und Partner, Consultores en Ingeniería Civil, en Stuttgart.

Estructuras notables: torres de televisión en Kiel y Colonia, cubiertas laminares, cubierta de cables en la Olimpiada de Munich, torre de refrigeración de cables de Schmehausen, puente atirantado sobre el río Hooghly en Calcuta, chimenea solar en Manzanares.